(S1) 知覚を持つ材料が拓く複合構造の未来

影山 和郎1·村山 英晶2·鵜沢 潔3

¹正会員 東京大学教授 工学系研究科技術経営戦略学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1) E-mail:kageyama@giso.t.u-tokyo.ac.jp

²非会員 東京大学准教授 工学系研究科環境海洋工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail: murayama@giso.t.u-tokyo.ac.jp

3非会員 東京大学講師 工学系研究科環境海洋工学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail: uzawa@giso.t.u-tokyo.ac.jp

材料とセンサを組み合わせ、構造物が受ける荷重履歴や使用環境などをモニタリングし、また損傷の有無や損耗の程度を検出できる材料を知覚を持つ材料と位置づける。繊維状という共通性から繊維強化複合材料と光ファイバセンサの組み合わせを本報では取り上げ、異分野融合の視点から、新材料複合構造を対象とした材料の知覚化の可能性について概説する。複合材料の製造技術に関しては、近年欧米において斬新な方法が相次いで開発されている。また光ファイバセンサの多様化と性能向上には著しいものがある。それらの最前線について概説するとともに、著者等の研究室で行っている知覚化材料の開発と構造ヘルスモニタリングについて紹介し、これらの新技術を活用する方法として知覚を持つ材料の未来を構想した。

Key Words: composite materials, fiber-optic sensor, FRP, structure, reinforcement, fabrication, DEFEW, FBG, OFDR, BOTDR

1. はじめに

土木・建築分野において、複合構造は主に鋼・コンクリート複合構造が中心のようであるが、複合構造委員会では、新材料による複合技術についても小委員会を設置して調査研究を進めておられるようである。著者等の専門は、繊維強化複合材料(いわゆるFRP)と光ファイバセンサを用いた構造へルスモニタリングであるので、異分野融合の視点から、新材料複合構造を対象とした材料の知覚化の可能性について紹介したい。複合材料の製造技術に関しては、欧米において新しい方法が次々と開発されている。また光ファイバセンサの多様化と性能向上には著しいものがある。本稿ではそれらの最前線について概説するとともに、著者等の研究室で行っている知覚化材料と構造へルスモニタリングについて紹介し、知覚を持つ材料が拓く複合構造の未来について、私見を述べてみたい。

2. 複合材料成形方法の新展開

いわゆるFRPの成形・製造については、近年生産性 やトータルコストを重視した新しい方法が開発されてい る. 中には現場施工に必ずしも適していないものをあるが、FRP成形技術における最近の展開を網羅的に紹介したい. 横文字の名称が頻出するが、それらの多くが日本ではなく、欧米で開発されていることを反映している.

(1)プリプレグ成形

(a) 自動積層機と CAE 技術

プリプレグのオートクレーブ成形法はすでに成熟の域に入っているが、近年の航空機分野の主役は自動化であろう.早くから ATL (Automated Tape Lay-up machine) [1]や FP (Fiber Placement) [2]など自動積層マシンの導入は進められていたが、従来その適用分野は一部の単純形状の部材に限られていた。それが、単にハンドレイアップの大きさを超えた大型部材への対応というだけでなく、品質管理、コスト低減の面からその運用範囲が拡大されている。そのためには、より複雑な形状の部材に対応する必要があるが、これには CATIA - CPD (Composite Design) [3] や、Fiber-SIM[4]など FRP 成形に特化したCAE Toolの支援が不可欠となっている。図-1 は B787 の胴体構造を、全 CFRP 構造のスキン・ストリンガー一体で、回転式の巨大なマンドレルと ATL 装置により積

層・成形を行ったもの (前後 7m, 幅 6m) である[5]. こ の構造・成形法により、パーツ数の激減と 20%もの軽量化が達成できたとのことである.



図-1 B787全CFRP製胴体セクション[5]

(b) OUICKSTEPシステム

一日数バッチ程度の生産量になると、オートクレーブのような汎用・混在型の成型機では生産効率に限界があり、さらに低コストと量産性を狙ってQUICKSTEP法が開発された[6]. これは小型部材の中規模量産性の観点から部材専用成形機としてオートクレーブを用いないでプリプレグの加圧成形を効率化したもので、図・2のように昇温・加圧媒体にオイル等の液体を利用している点が特徴である. オートクレーブのように空気を媒体とした温度管理では成形物の昇温速度は気体・物間の熱伝達率の限界があるが、QUICKSTEP法では液体を介しての熱伝導のため、直接的な温度管理が可能で昇/降温時間も短くすることができる. さらには流体を加振機により振動させて加圧・昇温時に層間のデバルキングを助長し成形品質を向上する等の工夫もされている.

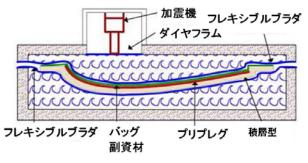


図-2 Quickstepプロセス

(c) 低温硬化性樹脂+オーブン成形

脱オートクレーブと呼ばれる成形法の中で,真空バッグによるオーブン成形は低温硬化性プリプレグによる大型構造物の成形方法として開発が進んでいる.

単にオートクレーブ寸法を超えた大型部材を成形する というだけでなく、製造コストの低減要求に対応するためには、積層型やランニングコストまで含めた硬化用オーブン設備の費用も削減する必要があり、その回答とし て低温硬化性のプリプレグが開発された. 一般に、成形 部材の大型化に伴ってその型ジグ費は飛躍的に増大するが、樹脂硬化温度を 100℃以下に抑えることで型材料に 安価なフォーム材や木材の利用が可能になる. この事は 特にワンオフ成形のプレジャーヨットや試作機などに有 効である. ACG 社の LTM 系プリプレグ[7]は硬化温度 55℃から適用可能で NASA 宇宙往還機 X-34 などの試作機や、昨年 X プライズを獲得した SpaceShipOne[8]の構造 材としても利用されている. しかし、プリプレグの可使 時間が最長でも数日と短いことから適用範囲が限られるようである.

また,真空圧のみでオートクレーブ並みのボイド率を達成する工夫に三菱レイヨン社#850 系低温硬化性プリプレグの片面タックタイプや ACG 社の ZPREG (図-3)などがある[9].

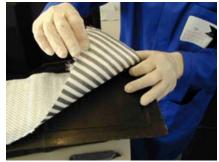


図-3 ZPREG 樹脂含浸の様子

(2) Liquid Composite Molding (LCM)

プリプレグを用いずに、ドライファブリックを成形型 にセットした後に樹脂充填を行う成形方法は、最近では 総じてLiquid Composite Molding (LCM) と呼ばれ, プリ プレグ成形法と区別されている. この手法もやはり部材 の大型化、低コスト化の流れの中で開発されてきたもの である. なかでも近年著しい進歩のあった成形法は VaRTM[10]であろう. もともとRTMやSRIMは、複雑な3 次元形状のネットシェイプ成形や、3軸織・ステッチン グ等、プリプレグ化しにくい強化繊維に対する成形を目 的として開発され、クローズドモールドに樹脂を圧入充 填することから比較的小型部品が対象であった. それが, 部材寸法の大型化にともなって、VARI[11]やLight RTM[11], 更には真空バッグを利用するSCRIMP[11], コ アインフュージョン法[12]など、さまざまな真空引きを 用いたVaRTM法に展開された. 成形方法の詳細は個々 の資料に譲ることとして、ここではこれらLCM法に関 するトピックをあげてみる.

(a) Vacuum Infusion (VI)

片面のみの成形型と真空バッグを利用した VaRTM 成形法を本報では Vacuum Infusion (VI) 法と呼ぶ事にする. 単に Resin Infusion(RI)法と呼ぶ事もあるようである.

VI 法は型コストや設備の簡便さが特長で、近年、急

速に普及した成形方法であり、マルチアキシャル等の多層ノンクリンプ織の厚物材を使用することで、特に大型部材の成形に対してコスト低減効果が発揮されている。例えば、風力発電用風車でも、大型ブレードに対してはVI 法が一般的となり、舟艇の建造においては殆ど VI 法が取って代わっている。

しかし、その成形法に対する敷居の低さとは裏腹に、あるいは敷居の低さがゆえに、十分な検討・品質管理が足りず、成形不良の発生も多く報告されている。また、プリプレグにくらべて製品の材料強度が製造プロセスにより大きく影響を受ける事も指摘されている。これらの理由から、当初 VI 法に熱心に取り組んで来たのは品質要求が厳しい航空・宇宙分野よりむしろ、スチレン排出の抑制や作業環境の改善などを目的としたプレジャーボートや風力発電ブレード等であった。

VI 法においては樹脂の流動抵抗による圧力低下から含浸部先端の近傍を除く広範囲では殆どバッグ圧が期待できず、結果として成形板厚、VF 管理の問題が起きやすい.この解決方法にはオートクレーブを用いてバッグ面を加圧しながら樹脂注入をおこなう Single-Line Injection (SLI) 法[11]がある. SLI 法はオートクレーブ圧の範囲で樹脂の加圧注入も可能であるが、しかし、樹脂注入の間もオートクレーブを占有してしまうことになる. SAERTEX 社の VAP 技術はこれらの問題を解決した方法で、図-4 のように、通気性はあるが樹脂は通さない半透過性のバッグの外側にさらに通常のバッグを重ねた 2 重シール構造を持つものである[13].

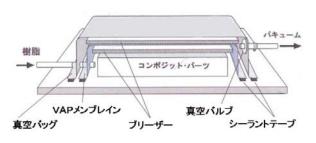


図-4 VAPバギング構造[14]

(b) Resin Film Infusion (RFI)

プリプレグ法と RTM 法との中間に位置する成形法に Resin Film Infusion (RFI) がある. 通常はプリフォーム時に積層型表面や層間に樹脂フィルムをセットし、オートクレーブを用いて加圧、含浸・硬化させるものである. オートクレーブの使用が可能な大きさ・コストの部材成形なら、多少粘度が高くともプリプレグで実績のある光靭性樹脂をそのまま流用できる. 本方法により、A380のリヤ圧力隔壁の成形で直径 6m もの 3 次元形状の一体成形が実現されおり、プリプレグでは不可能な 3 次元曲面への多方向材積層を可能にしている. 図-5 に平面形状のプリフォームとその積層の様子を示す[15].



図-5 A380圧力隔壁のプリフォームと積層の様子[15]

(c)プリフォーム

ドライファブリックを積層するプリフォーム作業では基材自身にタック性がないため、タッキファイヤやステッチングなどによりプリフォーム材を仮固定する必要がある。タッキファイヤにはスプレー糊のようなゴム系粘着材タイプやサイズ材のようにエポキシをベースにしたものがある[16]。ステッチングは層間強度や剥離進展に対する効果も期待されている。ミシンの構造から従来は平面形状に限って利用されてきたが、ALTIN社は2本の針を交差するように操ることで片面からステッチできる装置を開発し、フランジ/スティフナー等立上り部や曲面形状へ適用の範囲を広げている[17]。また簡便な方法としてプリフォームに面外から先の割れた針を刺して僅かな繊維を強引に上下層間に交差させる Zanchor[18]などが考案されている。

Non-Crimp Fabric (NCF) の登場は、その積層効率とドドレープ性の良さからプリフォーム工程に大きな影響をあたえ、VI 法の普及に大きく貢献したと言える. しかし、プリプレグの様に密着した積層ができないため、デバルク後に曲面やコーナー部で曲率の内側部に繊維のよれ・シワが入りやすく、とくに繊維の細い CF の場合は注意が必要である.

(3)熱可塑性樹脂系FRP(FRTP)

(a) SMC・BMCプレス成形

国内では熱可塑成形品というと樹脂だけか短繊維強化のインジェクション成形品のイメージが強いが、自動車部材など比較的大きな部材に対する成形方法として、近年プレス成型法が広まりつつある。特に PP や PC など汎用熱可塑樹脂に対しては繊維との接着性の問題や部材強度の要求から、長繊維を用いた Long Fiber Reinforced Thermoplastic(LFRT)が一つの解となる。射出成形の場合には繊維長数mmが限界であるが、SMC や BMC を用いたプレス成形の場合は 1 インチ以上の繊維長も可能であるばかりか、プレス時に部分的に連続繊維を追加して補

強するテーラリングも比較的簡単で、設計の自由度も大きい。また成形サイクルは冷却工程だけで、射出成形のような樹脂注入・冷却工程の繰り返しがないため、部材寸法が大きくなっても生産性が落ちることがない。さらには、ネットトリムが基本ではあるが、トリム・切抜き後の端材もインプラントリサイクルが可能であるなど材料歩留まりの利点もある[19]。欧州では自動車向けLFRTの市場は近年 10~20%もの伸びを示しているとの報告もされている[19]。

(b) 引抜き成形

熱可塑樹脂の連続成形としてはチャネル材の roll forming や連続プレス成型などがあるが、引抜き成形法でも汎用熱可塑樹脂の利用が試みられている。引抜き成形の主役である UP やビニエステルなど熱硬化性樹脂による成形品のウィークポイントである層間強度を改良するためだが、当然ウェットバスによる含浸は期待できない。そこで、射出成形のように溶融した熱可塑性樹脂を高圧で口金部に圧入して含浸させつつ目的の形状を連続成形する方法が採られている。この手法は強化繊維入り熱可塑樹脂のペレット製造機にも応用されているが、トウサイズの丸い単純形状でなく、任意の形状で成形するためには樹脂含浸部の金型設計が重要で、樹脂の注入位置や口金内の樹脂流動を数値計算などで検討している例も報告されている[20].

(c)新材料

リアクションタイプの樹脂として、硬化前の溶融時は熱硬化性樹脂のようにモノマー・オリゴマー的で低粘度であるが、加熱と触媒による硬化反応後は熱可塑性のPBTポリマーになる CBT 樹脂が最近開発された[21]. 硬化前の低粘度・含浸性と硬化後の高靱性という、熱硬化と熱可塑の両者の長所を兼ね備えている. この硬化反応は PBT 樹脂の Tg よりも低い 170℃から成形可能なため、通常の熱可塑性樹脂のように型内で冷却工程を待たずに脱型ができ、成形サイクルの効率化も期待できる. 当然ながら成形後は熱溶融・再加工などのリサイクル性もある. 10 年以上前にも同様のリアクションタイプの PC 樹脂が報告されているが、今回の CBT 樹脂はペレットとして供給されることから取扱い性が良く、RTM ばかりでなく、引き抜き成形からプリプレグ化まで幅広い展開が期待される樹脂である.

3. 光ファイバセンシング技術

次に話題を光ファイバセンサによるセンシングに移す. 光ファイバセンサの特徴,測定原理と構成による分類を 行い,光ファイバセンシング研究の現状を概観する.

(1) 光ファイバセンサの特徴

光ファイバセンサの主な特徴は以下のとおりである.

- ① 耐電圧性·耐電磁誘導
- ② 高強度・耐久性・耐食性
- ③ 安全防爆性
- ④ 細径・軽量
- ⑤ 可とう性
- ⑥ ネットワーク調和性
- ⑦ 分布型・準分布型センサシステム

これらの内①は実用的に使用する場合、例えば様々な 電気機器類を積んだ構造物に適用する場合重要な利点と なる(ただし、ガラスにはもともとファラデー効果(印 加磁界によって偏光面が回転する現象)があり、電磁誘 導を受けないわけではなく、普通の光通信方式や干渉計 出力に影響を与えないということである). ②に関して は、すでに大西洋・太平洋を横断している光ファイバケ ーブルにおいて十分な実証がなされていると言えが、も ちろんこの場合は、頑丈な被覆を持った光ファイバケー ブルが使用されている. 一方, 光ファイバセンサでは, 光ファイバ素線をセンサ部として使用することが多いが、 光ファイバの引張強度や疲労特性、耐環境性については、 主に光ファイバ素線や被覆のない光ファイバ (bare fiber) について詳しく検証されている. 特に長期間使 用され、かつ厳しい外環境に曝される構造物への適用に は欠かせない重要な特性であると言える. ③の特性によ り、危険物貯蔵施設などにも安心して適用することが可 能になる. 光ファイバセンサを構造物に設置・施工する 場合、④と⑤の特性は極めて有益であり、軽量であるこ とから、構造物の重量や動的特性を低下させることがな く, また細径で可とう性があることから, アクセスの難 しい複雑な部位へも自由に配置することが可能になる. ⑥により、もともと大容量通信を得意とする光ファイバ の情報伝達用のシステムと、センサ用の光ファイバを混 在させたネットワークを構築することが可能となる. 最 後に⑦は、既存の電気的センサでは実現が難しい光ファ イバセンサ特有の利点であり、ある物理量を光ファイバ 上の任意点で測定することができる線状センサの構築や、 ファイバの特定位置に高精度・高感度のセンサを複数個 配置したセンサネットワークを容易に構築することが可 能となる。現在、このようなタイプの光ファイバセンサ は、分布型・準分布型光ファイバセンサなどと呼ばれ、 最も研究・開発が盛んな対象である.

(2) 光ファイバセンサの分類

光ファイバセンサの紹介を行うにあたり、測定方法と 測定構成の2つの方法で分類する. 光ファイバセンサの 教本によれば、たいていは測定方法あるいは原理によっ て分類されるが、最近、上述した分布型・準分布型とい ったセンサがよく扱われるようになってから、測定構成、 すなわち測定対象をどのような空間的配置と分解能で計 ることができるのかによって分類することも意味がある。 ここでや、主に光ファイバセンサの共通の手法や原理、 特徴などについて解説する.

(3) 測定方法による分類

光ファイバセンサは、大きく分けて強度計測方式 (Intensiometric measurement) と干渉計測方式 (Interferometric measurement)に分類される. 前者では主にマルチモード光ファイバが、後者ではシングルモード光ファイバが用いられる. 強度計測方式のタイプでは、

- ① マイクロベンド (Microbending) 法
- ② OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) 法 によるセンサがこれまで検討されてきた. また干渉計測 方式のタイプでは.
 - ③ マイケルソン (Michelson) 干渉型センサ
 - ④ マッハ・ツェンダー(Mach-Zender)干渉型センサ
- ⑤ ファブリ・ペロー (Fabry-Perot) 干渉型センサといった干渉計を利用したセンサについて検討されてきた.この他には、精度・感度は良くないが広い領域の測定を得意とする2モード干渉型センサや偏波干渉型センサ,また高精度の光ファイバジャイロなどに用いられるリング干渉型センサがある.さらに近年、強度・干渉計測方式を併用して、光の波長、周波数スペクトルの情報やドップラー周波数シフトを利用するものもあり、
 - 6 FBG (Fiber Bragg Grating)
 - ⑦ ブリルアン (Brillouin) 散乱
 - ⑧ ラマン (Raman) 散乱
- ⑨ 湾曲した導波路で生じるドップラー効果などにも期待が寄せられている.これらの方式と特徴について以下に述べる.

(a)マイクロベンド法

光ファイバに微小な曲げ(マイクロベンド)が生じた場合,コアに閉じ込められていた光の一部がクラッドに移り、やがて放射される.その結果、光ファイバを伝搬してきた出力光強度は低下する.図-6のように、ある物理量の変化によりトランスデューサーが光ファイバにマイクロベンドを生じさせることができれば、その物理量に相関して受光量が変化することになる.このセンサの利点は、低コスト・高精度である.

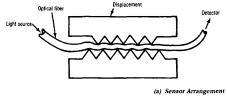


図-6 マイクロベンドセンサ

(b) OTDR 法

OTDR は、後述する分布型光ファイバセンサを可能に する技術の一つであるが、OTDR によって得られる光強 度出力自体をセンサとして用いる場合もある. 光ファイ バ伝送システムでは、外的な要因での損失と光ファイバ 固有の損失により伝搬の途中で光の一部が失われてしま う. 前者を利用したものが上述したマイクロベンド法に よるセンサであり、後者の内、レイリー(Rayleigh)散 乱損失を利用したものがここで述べる OTDR である. レ イリー散乱の内、伝搬光の進行方向と逆側に散乱される ものをレイリー後方散乱と呼ぶが、OTDR ではこのレイ リー後方散乱光の強度を測定している。 光源をパルス状 にして光ファイバに入射すると、パルス光が存在する場 所で後方散乱光が生じる. パルス光を発射してから受光 器が後方散乱光を検知するまでの時間は、光源から散乱 が発生した位置までの距離に比例する. この距離に比例 して光の伝搬損失は大きくなるため、OTDR から得られ る光ファイバの損失分布は図-7のようになる.

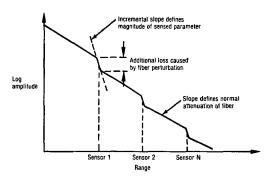


図-7 OTDR から得られる損失分布

一方、光ファイバが破断などの損傷を受けた場合、フレネル反射が生じ、逆にその位置からの戻り光の強度は増加する。光ファイバを物体に固定し、その物体の損傷・破壊に伴ってファイバが破断されるようにすれば、損傷・破壊検知ができる。

(c)マイケルソン干渉型センサ

マイケルソン干渉型センサは、マイケルソン干渉計を 利用したもので、次のマッハ・ツェンダー干渉型と同様 に一つの光源から発射された光線を2つに分けて、受光 器で検出する前にこれら2つの光波を干渉させる最も基 本的な干渉型センサである.

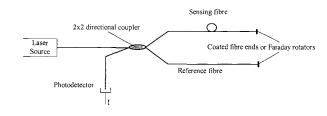


図-8 マイケルソン干渉型センサの構成

図-8 はマイケルソン干渉型センサの一つの基本形態 である。ここでは、一つの光分岐器(光ファイバカプ ラ)を中心にシングルモード光ファイバが4本のアーム となって構成されている. 光ファイバのアームの一端に レーザ光源を多端に光検出器をつなぎ、残りの2つのア ームから反射される光の位相差で計測を行う. 極めて高 感度でかつ応答時間も早いが一般的には広いダイナミッ クレンジでの計測が困難である. また光ファイバが2本 に分かれているセンサの構成上、構造部材への固定・取 り付けに不便な面もある. また多点化を実現するには, 光ファイバ毎に測定領域を分割する手法(空間分割多重: Space Division Multiplexing, SDM) を選択することにな る. 最も大きな課題は干渉する2光波の偏波面の変動で ある. 前述したように光ファイバ中の光はファイバ内を 伝搬する際に、その偏波面を緩やかに変化させている. 干渉信号は2つの光波の偏波面が一致しているときに最 も強く干渉し(最大のビジビリティ)、偏波面が直交す るときにビジビリティが 0 になる. この性質は受光の S/N 比を変動させるため、リモートセンシングの障害と なる. この解決策として、偏波面保持光ファイバを用い ることができるが、この解決策として、偏波面保持光フ ァイバを用いることができるが、この場合コストが割高 になる. あるいは、図-8 のように FRM (Faraday rotator mirror) を用いることも有効である.

マイケルソン干渉型センサは、ひずみ、温度、圧力な どを測定することができる. さらに、センシング用のフ ァイバに電磁界、音圧などに応答するトランスデューサ ーをつけることで磁気センサや音響センサなどを構築す ることができる. マイケルソン干渉型センサはその構成 が非常に単純なため、構造モニタリング用の光ファイバ センサとして早くから検討されており、光ファイバを複 合材料積層板の積層間に埋め込み、材料が破壊するとき に発生する弾性波である AE (acoustic emission) を測 定した研究例などがある[22,23]. マイケルソン干渉型 センサは、温度にほとんど影響されることなく AE など の微小振動を検知できるほどに高感度であるものの、干 渉型センサとしての総合的な性能は、後述するマッハ・ ツェンダー干渉型センサやファブリ・ペロー干渉型セン サに及ばず、多点測定が可能な FBG センサなどに後塵を 拝していると言わざるを得ない.

(d) マッハ・ツェンダー干渉型センサ

マッハ・ツェンダー干渉型センサの基本構成を図-9 に示す. 参照用アームとセンサ用アームに分割, またそれらを結合するためのカプラには, 配分が50:50 の3dBカプラが用いられる. マイケルソン干渉計と比べた場合, ノイズ除去などの点でマッハ・ツェンダー干渉計のほうが若干優れている. マイケルソン干渉計とマッハ・ツェ

ンダー干渉計はセンシングシステムを構成する際に大きな互換性を持っている。マッハ・ツェンダー干渉型センサでは 10⁻¹³m (0.1pm) の長さ変化を感知することができる。マッハ・ツェンダー干渉型センサは、高感度ハイドロフォンへの適用が進んでいる[24].

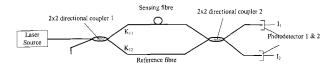
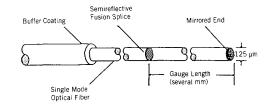


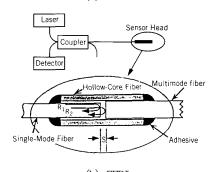
図-9 マッハ・ツェンダー干渉型センサ

(e) ファブリ・ペロー干渉型センサ

ファブリ・ペロー干渉型 (FPI) センサは、非常に高感度で、適用性の広い光ファイバセンサである. そのため干渉型の光ファイバセンサでは、研究・開発例も多く、製品化されている測定器もいくつかある.



(a) IFPI



(b) EFPI

図-10 ファブリ・ペロー干渉型センサ

FPI センサは、マイケルソンやマッハ・ツェンダーと 異なり、参照用のアーム(光ファイバ)が必要ない. FPI センサには、図-10 (a)の Intrinsic FPI(IFPI)センサと(b)の extrinsic FPI(EFPI)センサがある[25].

前者の IFPI センサは、融着接続されたハーフミラー端面と大きな反射率を持つようにコーティングされた反射端を数 mm 程度の距離で対抗させた構造を持っている。 光ファイバ中の伝搬光はハーフミラーで一部反射され、一部透過して行き、もう一方の端面でほぼ完全に反射されて戻っていく。2つのミラーから反射された光束は、光の入射端で分岐されて、ファブリ・ペロー干渉信号として受光される。2つのミラー間の距離変化は、2光束の位相差の変化となり、干渉波形の変化となって観測される。マイケルソン干渉型センサ同様に、高感度である

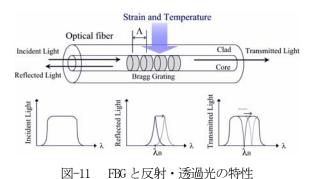
が、ダイナミックレンジは狭く、またミラー間での偏波 変動の影響を受ける.

一方、後者の EPPI センサは、中空のスリーブ内に2本の光ファイバを対向させるように挿入し、わずかにギャップを空けた構造になっている。伝搬光は2つの光ファイバ端面で反射されたファブリ・ペローモードが発生する。通常ギャップの間隔は数 cm と狭く設定できるため、コヒーレント長の短い光源でも干渉を生じさせることができる。

FPI センサは、構造物への取り付けが容易であり、極めて高感度でロバストな単点型のひずみまたは温度センサとして使用することができる.現在は、感度、耐久性などに優れる EFPI タイプが主流である.一般的に入手できる EFPI センサの直径は 350 μ m、ゲージ長は 2 μ m から 20 μ m までである[26].ひずみ測定における分解能は 0.050 μ m、測定域は \pm 5000 μ mであり,優れた特性を示している.EFPI はひずみ、温度、圧力、振動、音響センサなどとして使用することができるが、特に高温での適用性に非常に優れており、これまで、石英光ファイバであれば 1000℃を超える温度域で測定可能なシステム研究・開発例がある[8,9].サファイヤ光ファイバを使用すれば、その融点は 2000℃を超えるため、温度センサでは 1800℃程度まで適用できると考えられている[27].

(f) FBG (Fiber Bragg Grating)

光ファイバブラッググレーティング, すなわち FBG は, 紫外線を用いて光ファイバのコア中に回折格子を形成し, 通信分野では光フィルタとしての機能を持たせた光ファイバ型デバイスとして用いられている. 回折格子を光ファイバ中に非破壊的に直接形成できるため, 低損失・小型・高信頼性・伝送用光ファイバとの整合性など, 多くの利点を有している.



ゲルマニア (GeO_2) をドープした光ファイバのコアに、波長 250nm 前後の紫外 (UV) 光を照射すると、光誘起屈 折率変化 (Photosensitivity) によりその屈折率が変化し、照射を止めた後も持続する。このことは 1978 年、Hill らによって発見された[28]. FBG は、光ファイバの

コアに W 光の干渉縞を形成して、周期的な屈折率変化を書き込んだもので、これが回折格子(グレーティング)として働く. 1989 年に、任意周期の屈折率変化を持ったグレーティングを作成する方法(ホログラフィック干渉法)が提案され[19]、それ以降 FBG の研究が通信分野のみならず、センシング分野でも急激に活発化した.

グレーティングの周期を Λ ,光ファイバの有効屈折率を $n_{\rm eff}$ とすると、次の式を満たす波長(ブラッグ波長) $\lambda_{\rm e}$ で強い反射が生じ、その他の波長では透過する(図-11).

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{3-9}$$

屈折率 $n_{\rm eff}$ =1.45 程度であるから、 $\lambda_{\rm eff}$ =1.55 μ m とするためには、 Λ =0.54 μ m 程度になる。反射の強さと反射帯域幅は、屈折率変化の大きさと FBG 長によって様々だが、長さ数 cm で反射率 100%、反射帯域も 0.1 μ 1 μ 1 μ 1 μ 2 としては、FBG 長(ゲージ長)が 1cm で、反射率が 90%程度のものが一般的であり、FBG 部(センサ部)はポリイミド被覆でコーティングされて出荷されることが多い。

FBG 部に 1μεの一様ひずみが発生した場合, 1pm 程度の 波長変化が生じる. この波長変化を観測することで FBG 部のひずみ量を算出することができる(図-11). 温度 の変化に対しては, 13pm/C程度である.

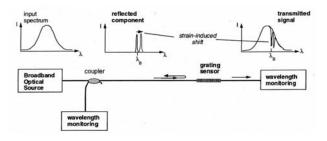


図-12 FBG センサの基本構成

FBG を用いたひずみ・温度計測システム(以下 FBG センサ)の基本構成は、図-12 に示すように反射光、透過光の両方を利用することができる[30]. 光源には LED、SLD、ASE(順に光のパワー及びコストが高い)のような広帯域光源を利用する. 構造モニタリングに FBG センサを使用する場合、反射光を観測するシングル・エンド方式をとることが多い.

シングル・エンド方式を採用する場合,FBG からの反射光の波長を測定・決定する技術が計測の応答時間及びひずみ・温度測定における感度を決定することになる. これについてはいくつかの手法があるが,ここでは代表的な3手法と最近開発された1つの手法について述べる. ① 光スペクトルアナライザ

光スペクトルアナライザは、波長領域でのスペクトル 分析を行うもので、そのスペクトルからピーク波長また は中心波長を求めるものである。分光方式としては、干 渉分光方式と分散分光方式がある. 前者にはマイケルソン干渉計やファブリ・ペロー干渉計による分光が,後者にはプリズムや回折格子による分光がある.

② Ratiometric

FBG からの反射光の内、光学フィルタを通過する波長成分とレファレンスの反射波長成分の比を求める方式で、最も簡単に波長を特定することができる。強度の比を検知することで、操作的な機構が不要なため応答速度は極めて早く、信号処理部の速度が応答速度を規定する。ナノセカンドオーダーの速度(IMHz 以上)が期待できる[31].一方、波長精度および分解能は、光学バンドパスフィルタのエッジ特性(波長依存性の透過率)と、光強度の検出精度が規定する。光学バンドパスフィルタのエッジ特性は線形ではなく、さらにリップルが存在する場合もあり、一般的には波長検出精度はそれほど高くない。50mmの波長帯域幅では、十数 pm 程度が得られ、FBG を用いたときのひずみ分解能では±5με程度である。

3 Tunable passband filter

ピーク透過波長をチューニングすることのできる狭帯域のフィルタをスキャニングさせながら FBG からの反射光を検知する.このときの検出強度の変化からスキャニングのためにフィルタに加えた駆動電圧値から波長を特定する. Tunable filter としては音響光学フィルタ,ファブリ・ペローフィルタ, FBG フィルタ (FBG をバンドパスフィルタとして用いる) などが用いられる.図-13には、Scanning FP (Fabry-Perot) filter を用いた測定システムの構成例を示す. Tunable filter としてファブリ・ペローフィルタを使い、ファブリ・ペローフィルタの空隙を圧電素子でスキャンする. 圧電素子に三角状の変動電圧を印加して出力信号変化を観測する.出力信号変化を微分してゼロクロスポイントを求める手法は信号処理的に有効であり、高い波長分解能が得られている.

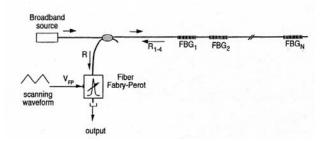


図-13 Turable passband filter を用いた測定システム構成例

この方式を使って図-13 のように1本の光ファイバに複数の FBG を配置する準分布型センサを構築する場合, Tunable passband filter の FSR (free spectral range)が重要になる. 一般的なファブリ・ペローフィルタであれば、FSR は 50nm、バンド幅は~0.3nm である. このとき, 3nm の変動域、すなわち±1500μεの範囲を測定できる FBGを 16 個配置することができることになる. 波長の読み

取り分解能は 0.8pm, ひずみに換算すれば 0.8pmを達成できる. 現状では数百 Hz の変動ひずみを測定できる.

(4) OFDR

井川、村山ら[32]は、OFDR(Optical Frequency Domain Reflectometry:光周波数領域リフレクトメトリ)を用いたFBG ひずみ測定システムを開発している。この計測方法はFBG 内のひずみを分布的に測定することができ、さらに1本の光ファイバ上の任意点にFBG を複数個取り付けることもできる。過去の研究では、1本の光ファイバ上に800個のFBGを配置してひずみ測定を行った準分布測定の例もある[33]. さらに、上述した BOTDR やBOCDA の空間分解能は、前者が 1m 程度、後者が1cm 程度であるのに対して、OFDR によるFBG を用いたひずみ測定システムは空間分解能 1mm 以下での測定が可能であるため[32]、微小な範囲でひずみが大きく変動することが考えられる継手部のひずみモニタリングへの適用も進められている。

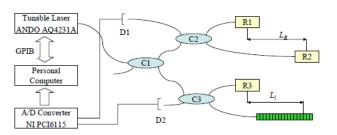


図-14 OFDR-FBG 計測システム

ODFR を用いた高空間分解能ひずみ計測システムの光学系およびデータ集録・解析系の構成を図-14 に示す. 波長可変光源から出た光は分光器 C1 で二手に分けられ, 分岐された一方は, D1, C2, R1, R2 で構成される干渉計に到達する. もう一方の光は, D2, C3, R3, 及び特定の波長を反射する FBG によって構成される干渉計に到達する. 一方, 受光器 D1, D2 の干渉信号は, AD コンバータによって集録される. 波長可変光源で波長が変化すると, 受光器 D1 で計測される信号は一定の波数間隔で変動する正弦関数となる. この一定の波数間隔をトリガとして, 受光器 D2 で信号を検出し, パソコンデータ解析することで FBG のゲージ内のひずみ分布が求められる.

(g) ブリルアン (Brillouin) 散乱

ブリルアン散乱は,入射単色光が媒体中に生じる音波と相互作用して周波数がずれて散乱される現象である. 散乱光のスペクトルは,図-15 に示すように 3 つのパラメータによって特徴づけられる. すなわち,ブリルアン 周波数シフト ν_{h} ,ブリルアンゲイン線幅 $\Delta\nu_{h}$,そしてブリルアンゲイン係数 ν_{h} であり[34,35], ν_{h} は,

$$v_B = \frac{2nV_a}{\lambda} \tag{1}$$

で与えられる. ここで、ブリルアンゲイン線幅はスペクトルの半値全幅であり、ゲイン係数はスペクトルのピーク値である. また、式(1)のnは光ファイバのコアの屈折率、 V_a は音速、 λ は入射光の波長である. この周波数シフトが、光ファイバの長さ方向に生じたひずみ、または温度に依存することから、この依存性をひずみセンサに利用することが提案された[36,37].

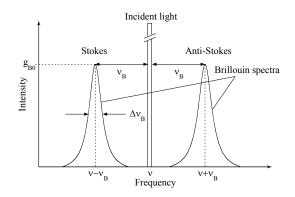


図-15 ブリルアン散乱光の周波数スペクトル

ブリルアン散乱光を利用して、光ファイバに沿ったひずみや温度を測定する方式には Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA) と Brillouin Optical Time Domain Reflectometry (BOTDR)がある。前者の場合、光ファイバ内を対向して進むポンプパルス光とプローブパルス CW 光を利用して光ファイバ長手方向のブリルアン周波数を測定し、後者では OTDR 方式を用いて計測する。 どちらの方式でも一般的なシングルモード光ファイバをそのまま使用することがでる。また、BOTDR はシングル・エンドで構成するので、構造への光ファイバの施工はより簡単である。ここでは、BOTDR の原理について示す。BOTDR の入射光の波長が 1550nm のとき、ブリルアン周波数シフトは約 11GHz である。このとき、ひずみと温度の変化なに対する周波数シフトみ。の関係は次式で与えられる[38]。

1550nm: $\frac{\partial v_B}{\partial \varepsilon} = 493 [\text{MHz}/10^4 \mu \varepsilon], \quad \frac{\partial v_B}{\partial T} = 1.00 [\text{MHz}/^{\circ} \text{C}]$

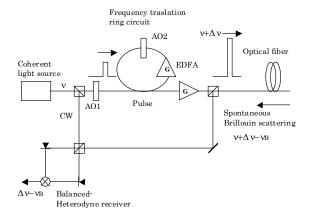


図-16 BOTDR の基本構成

図-16 は BOTDR の基本構成である[39]. 光源から発生し た周波数vの連続光 (CW 光) は, acousto-optic pulse modulator (A01) によりパルス光に変換され、リング回 路に入射される. パルス光は erbium-doped fiber amplifier (EDFA) で増幅され、acousto-optic frequency shifter (AO2) により周波数シフトを受け、周波数μΔν のパルス光として被測定光ファイバの片端に入射される. パルス光の入射により光ファイバ内で散乱光が発生し、 この散乱光のうち、後方に散乱した光(後方散乱光)が 周波数vの CW 光と合波され検波器へ入射される. ブリル アン散乱光の周波数は、入射パルス光に対してブリルア ン周波数シフトκだけシフトして μΔν-κとなり、参照 光である周波数vのCW光との合波から、ヘテロダイン検 波器を用いて周波数Δν-μのビート信号が取り出される. A02 による周波数シフト量Δνを κ 近傍で掃引させること によってブリルアンゲインスペクトルが測定される. な お, Δνが μに一致するときにビート信号の出力すなわち スペクトルは最大となる.後方散乱光の発生位置を OTDR 法によって求めることにより、光ファイバ長手方 向の各位置におけるブリルアンゲインスペクトルが得ら れ、そのピークを与える周波数としてゅを求めることが できる. このときスペクトルの形状 &(Δν,ν)は,

$$g_B(\Delta v, v_B) = \frac{g_{B0}}{1 + 4(\Delta v - v_B)^2 / \Delta v_B^2}$$
 (2)

として、ローレンツ型関数で記述される. BOTDR では、このスペクトルのピークの変化から光ファイバに生じたひずみを求めている.

BOTDR の空間分解能 δz は、パルス幅W、ファイバ中の光の群速度 V_z に対して以下の関係がある.

$$\delta z = \frac{v_g W}{2} \tag{3}$$

この式は、パルス幅を狭めれば空間分解能が高まることを示している。空間分解能とパルス幅の関係は図-17 に示す。しかし、パルス幅が狭まるとブリルアンスペクトルが広がるとともに測定される信号強度が減少する。このため、スペクトルの中心周波数決定精度、すなわち測定精度が低下する[40,41].

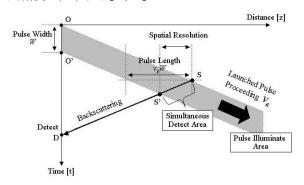


図-17 空間分解能とパルス幅の関係

保立等[42-47]は、コヒーレンス関数の合成法により 誘導ブリルアン散乱を制御する、ブリルアン散乱光相関 領域解析法 (Brillouin Optical Correlation Domain Analysis; BOCDA) を開発している。前述の光パルス技術 では実現が不可能であった cm オーダーの空間分解能や 数 10 Hz の高速サンプリング、さらにはランダムアクセ ス機能等を具備した新しい分布計測技術を開発している。 この技術を応用して、痛みの分かる材料・構造のための 光ファイバ神経網技術を提案し、建築構造物の構造へル スモニタリングにも適用している[48, 49]

(h) ラマン散乱

後方散乱光には、上述したブリルアン散乱光以外にも、入射光と同じ波長のレーレ散乱光と波長が異なるラマン散乱光が含まれている。ラマン散乱光は、入射光がガラスの格子振動とエネルギーの授受を伴う非弾性的な相互作用によって生じ、それには振動数が入射光より低いストークス光と高いアンチストークス光がある。ラマン散乱光の強度は温度に依存し、アンチストークス光とストークス光の強度はは、次式に示すように、入射光波長とガラスの組成が決まれば、理論的に温度だけに依存する[50].

$$\frac{I_a}{I_s} = \frac{\left(v_0 + v\right)^4}{\left(v_0 - v\right)^4} \exp\left(-\frac{hc \, v}{kT}\right) \tag{4}$$

ここで、 I_a と I_s はそれぞれアンチストークス光とストークス光の強度、 V_0 と V_0 はそれぞれ入射光波数と格子振動波数、 I_0 はプランク定数、 I_0 は光速、 I_0 は光速、 I_0 は絶対温度である.

ラマン散乱光を利用した光ファイバ温度センサでは、後方散乱光のうちラマン散乱光の二成分(アンチストークス光:約870nm、ストークス光:約950nm)を光学フィルタで分離して、この二成分の強度を検出する。また測定点の位置はBOTDRと同じく、光の往復時間から特定する。光ファイバには、一般的なシングルモード、マルチモードどちらも使用することができる。

(i) DEFEW

ループ状の光ファイバを用いた音響・振動センサは、 米国Naval Research Laboratoryを中心に、1970年代後半から精力的に研究開発が行われていたが[51],[52],これらの光ファイバセンサは光弾性効果を利用した圧力センサと位置づけることができよう。著者らは2001年に偶然から、伸縮・湾曲可能な導波路を伝搬する光のドップラー効果と呼ぶべき興味深い現象を発見した。それから約4年が過ぎたが、測定原理は理論的に明らかになり[53,54],この原理を利用した光ファイバセンサの商品開発と実用化研究が大学発ベンチャーにより進められている。ここでは、この光ファイバセンサの計測原理と計測システムを紹介する。

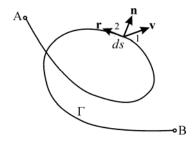


図-18 湾曲した導波路と伝搬する光

図-18 のように、端点 A から光を入射し、有限長さ L の湾曲した伸縮可能な導波路 Γ を伝搬した後、他端 B で計測する光のドップラー効果について考える.

このときのドップラー周波数シフトは、導波路 Γ に沿って測った全長Lの変化から、導波路の等価屈折率を n_{eq} として、次式で与えられると考えられる.

$$f_D = -\frac{n_{eq}}{\lambda_0} \cdot \frac{dL}{dt} \tag{5}$$

解析幾何学により湾曲した導波路長さの時間変化 dL/dt は、次式で与えられる.

$$\frac{dL}{dt} = \left[\mathbf{v} \bullet \mathbf{t} \right]_A^B + \int_{\Gamma} k \cdot \mathbf{v} \bullet \mathbf{n} ds \tag{6}$$

ただし、t は端点における光の進行方向単位ベクトル、n とれは湾曲部における主法線ベクトルと曲率、v は変位速度ベクトルである.式(5)と(6)を組み合わせると「伸縮・湾曲可能な導波路を伝搬する光のドップラー効果 (Doppler Effect in Flexible and Expandable Light-Waveguide; DEFEW)」が次式で与えられる[54].

$$f_D = -\frac{n_{eq}}{\lambda_0} [\mathbf{v} \bullet \mathbf{t}]_A^B - \frac{n_{eq}}{\lambda_0} \int_{\Gamma} \kappa \cdot \mathbf{v} \bullet \mathbf{n} ds$$
 (7)

通常,端点AとBは計測器内あり,変位速度ベクトルは一致するが光の進行方向は逆向きなので,上式右辺第1項は打ち消し合い零となる.

導波路の経路 Γ を与えると、計測対象の変位速度場から式(7)の積分を行ってドップラー周波数シフトの理論値を計算することができる。センサ形状は様々な形態が考えられるが、ここでは円形ループと長円ループの場合の計算例を紹介する。

図-19 に模式的に示すような、渦巻き型及びコイル型のループセンサの場合について考える。一重の半径 Rの円形閉ループが一様なひずみ速度場 $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_x$, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_y$, $\dot{\boldsymbol{\gamma}}_x$,にあるとすると、式(7)より与えられるドップラー周波数シフトの理論値は次式となる[55]。せん断ひずみ速度はドップラー周波数シフトに関係しないことがわかる。またこの形状のセンサは指向性が無く、主ひずみ和速度を測っていることになる

$$f_D^{th} = -\frac{\pi R n_{eq}}{\lambda_0} \left(\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y \right) = -\frac{\pi R n_{eq}}{\lambda_0} \left(\dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 \right) \quad (8)$$

N巻のループの場合は、その平均半径を Rw として感

度はN培となる.

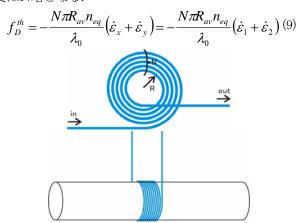


図-19 円形ループ状センサ

特別な場合として、円の中心に振動源があり、そこから放射状に弾性波が伝播する場合を考えると、その変位速度ベクトル \mathbf{v} の方向は円形ループの法線ベクトルに一致し、その絶対値 $V_{\mathbf{k}}$ は方向 θ に依存しないから、次式のようになる [56]. これは、等価なひずみ速度を $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_R = V_R/R$ で定義したとき、式(9)の $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_x = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_y = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_R$ とした場合に相当する.

$$f_D^{th} = -\frac{2N\pi n_{eq}}{\lambda_0} V_R \tag{10}$$

図-20 に示すような長円形ループの場合,一様なひずみ速度場を仮定すると次式が得られる.

$$f_D^{th} = -\frac{n_{eq}}{\lambda_0} \left\{ (\pi R + 2l) \dot{\varepsilon}_x + \pi R \dot{\varepsilon}_y \right\}$$
 (11)

$$S_{xy} = 1 + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{l}{R} \tag{12}$$

この形状は、長ゲージ長センサとして構造体のマクロなひずみを計れるばかりでなく、ひずみ速度感度に指向性があり、x方向とy方向の感度の比率 S_{xy} は式(12)となるので、長さ l を半径 R より十分に長く取ると、近似的に一軸センサとして利用することもできる.

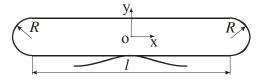


図-20 長円形ループセンサ

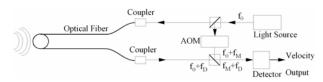


図-21 計測システム

図-21 に模式的に示すように、周波数が安定した光源 から湾曲した光ファイバセンサ部にコヒーレント光を入 射し、ヘテロダイン干渉計を用いて基準光と干渉させ、 受光部で受けた光強度信号を、FV回路で周波数検波すればドップラー周波数シフト量を計測することができる.

開発当初は、既存のレーザードップラー速度計を利用したため、可視光(波長 633 nm)の He-Ne レーザを光源に利用していた。 He-Ne レーザは可干渉長さが長いので、比較的容易に干渉系を構成できるため、実験室レベルでの計測には適している。その性能の一例を表-1に示す[53],[57]。ピコストレインオーダーの極めて高い感度と 0.1 Hz - 3 MHz という広い周波数特性が同時に達成されている。

表-1 DEFEW センサの性能 (He-Ne レーザ光源)

Frequency Range		0.1 Hz-3 MHz				
Resolution		10Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz	1 MHz
	Strain Rate (µɛ/s)	0.44			4.4	44
	Strain (με)	0.01	0.0001	0.00001	0.00001	0.00001
Total Dynamic Range (dB)		160			140	120

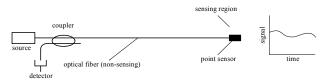
He-Ne レーザ用の光ファイバセンサは高価で入手が難しいこと、伝搬損失が大きいこと、安価で大出力の光源が得られないこと、長時間連続運転での安定性に欠けることなどの理由により、赤外光の半導体レーザを光源とした計測システムが開発されている。この計測システムは、ダムの配水管の長時間連続モニタリングに適用され、高い安定性と信頼性を証明した。

(4) 測定構成による分類

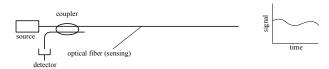
光ファイバセンサは空間的に存在する情報をいくつかの方法で取得することができる。図-22 に分類された光ファイバセンサの構成を示す。まず単点測定(point sensing)とは、ある一点を凝視して情報を取得する方法である。この場合、測定器からはある時間にある一点の情報が一つだけ得られる。これは既存のセンサ、例えば抵抗線ひずみゲージや熱電対などがそうであり、最も一般的な方法で、光ファイバセンサについては比較的簡単な光学機器の構成と信号処理で実現できる。この場合光ファイバは主に伝送路としてリード線に使用される。上記センサでは、ファブリ・ペロー干渉型センサがこれにあたる。次に領域測定(integrating sensing)とは、任意の長さの光ファイバを測定領域とし、その領域の平均的な物理量を測定するものである。

なお"integrating sensing"は広域測定と呼ばれることもあるようだが、ここでは領域測定と呼ぶことにしている。この場合単点測定と同様に、測定器からはある時間にある一つの領域の情報が一つだけ得られる。マイケルソン干渉型センサ、マッハ・ツェンダー干渉型センサがこれにあたる。多点測定(multiplexed point sensing)とは、多数の点情報を一挙の取得することができる構成で、光センサないし光ファイバセンサを持つ

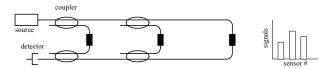
多数の光ファイバを最終的に一本の光ファイバにまとめ ることで実現される. それぞれの測定点の情報は、時間 差や周波数,波長などの2次的な情報をもとに分離検出 することができる. 次に準分布測定 (quasi-distributed sensing) とは、一本の光ファイバの任意位置に測定点 となるトランスデューサを設置した構成であり、多点測 定と同様の方法によって分離検出する. この場合, 測定 点の情報は不連続な位置の情報も併せて得ることができ る、また準分布測定が可能な光ファイバセンサは、準分 布型光ファイバセンサと呼ばれる. 上記センサでは、マ イクロベンド方式と FBG センサが準分布測定可能で、 FBG は多点測定も可能である. 最後に分布測定 (fullydistributed sensing or distributed sensing) とは、光 ファイバ全長にわたり任意の位置を測定点として作用さ せることができる構成であり、測定点の情報は連続な位 置の情報と併せて取得することができる. また分布測定 が可能な光ファイバセンサは、分布型光ファイバセンサ と呼ばれる OTDR, BOTDR, FTR などがこれにあたる.



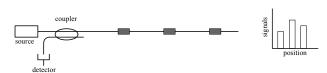
(a) 単点測定 (point sensing)



(b) 領域測定 (integrating sensing)



(c) 多点測定 (multiplexed point sensing)



(d) 準分布測定 (quasi-distributed sensing)



(e) 分布測定 (distributed sensing)

図-22 測定構成による光ファイバセンサの分類

4. 知覚を持つ複合材料構造

構造物に光ファイバセンサネットワークを配置することにより、それらが置かれている環境や荷重条件をモニタリングすることができる.ここでは複合材料とその構造モデルを対象に、温度、振動、AE、ひずみ、変形を種々の光ファイバセンサでモニタリングした実例を紹介する.

(1) 光ファイバセンサネットワークを持つ複合材料パネル

知覚を持つ複合材料構造をデモンストレーションする ため、著者等の研究室では、光ファイバセンサネットワークをもつ複合材料パネルを作製し、その可能性を検証 した[8].

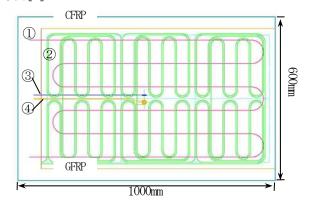


図-23 光ファイバセンサネットワークを持つ複合材パネル

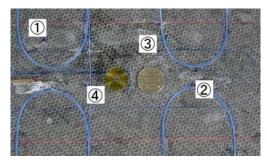


図-24 パネル中心部の拡大

図-23, 24 に示すように、CFRP で作製したパネル上に ①から④の4種類の光ファイバを配置し、光ファイバの 保護及び固定を兼ねて、ガラスファイバクロスをウェットレイアップにより積層・固定した。それぞれの光ファイバには下に示す測定器を接続した。計測システムを 図-25 に示す。データは、全て PC により集録した。

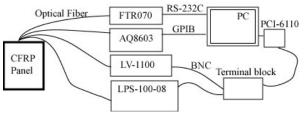


図-25 計測システム

①光ファイバ歪みアナライザ [AQ8603, 安藤電気]

後方ブリルアン散乱光のスペクトル変化よりひずみ分布の測定が可能である. 空間分解能 lm, 測定精度±0.003%という特長を持つが, 最近の研究により, 空間分解能は数十cmまで向上している.

②光ファイバ温度レーダ [FTR070, 日立電線]

後方ラマン散乱光の光強度の計測により温度分布の測定が可能であり、空間分解能 2m、測定精度 ± 1 $^{\circ}$ という特長を持つ、

③FBG 計測装置 [LPS-100-04, Lumen Photonics]

この装置は、Fiber Bragg Grating(FBG)によって反射された光の波長変化を光強度に変換し、強度変化からひずみを測定できる。 周波数帯域幅 $OHz\sim100kHz$ 、測定精度 ±0.0005 %の性能を持つ。

④DEFEW 振動計 [LV-1100 改造型, 小野測器]

光ファイバをループ状に固着した箇所のひずみ速度を 測定し、数 Hz~数 MHz の周波数帯域幅に対応できる.

パネルの短辺側を単純支持し、ファイバ面が凹になるように中央をたわませた状態で、光ファイバ歪みアナライザによってひずみを計測し応力分布を求めた. 同時に、FBG 計測装置により局所ひずみを測定した. また、パネルを6分割したうちの一箇所を白熱灯で温め、光ファイバ温度レーダによって温度分布を測定した. さらに、パネルに振動を与えた時、FBG 計測装置及びレーザドップラ振動計により弾性波を計測した.

(a) ひずみ分布計測

光ファイバ歪みアナライザによるひずみの測定結果を図-26 に示す. このグラフは, 光ファイバの距離に対するひずみの値を表している.

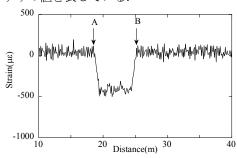


図-26 光ファイバの距離とひずみの関係

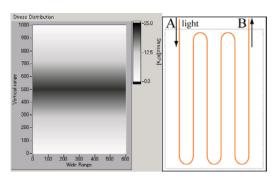


図-27 BOTDRによるひずみ分布測定結果

この結果から、パネルに作用しているひずみ分布を 表示することができる、その様子を図-27に示す.

(b) 温度分布計測

光ファイバ温度レーダを用いることで、図-28 に示すように、光ファイバの距離に対する温度変化を計測できる。この測定結果と光ファイバの配置方法により、パネル表面の温度分布が分かる。その様子を図-29 に示す。

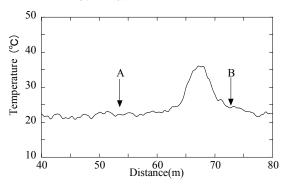


図-28 光ファイバの距離に対する温度変化

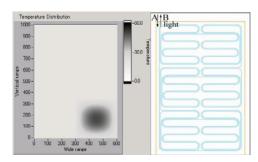


図-29 パネル表面の温度分布の表示

(c) 局所ひずみ計測

パネルの裏から指で叩いた時, FBG 計測装置が検出した動的な信号波形を図-30に示す.

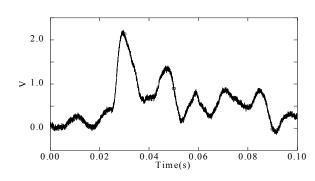


図-30 FBG による動的ひずみ計測

(d)ひずみ速度計測

シャープペンシルの芯の圧折によって AE を発生させた時, DEFEW 振動計が測定した信号を図-31 に示す. また,パネルを爪で引っ掻いた時の測定された信号波形を図-32 に示す.

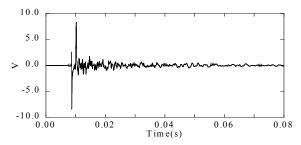


図-31 シャープペンシルの圧切に伴う振動

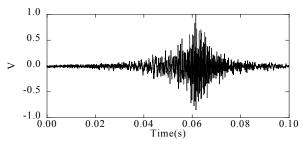


図-32 爪のひっかきによる振動

(2) BOTDR による大型複合材料構造のひずみ分布計測 著者等は大型 CFRP 構造であるアメリカズカップ艇 (全長およそ 25 m) と宇宙往還技術試験機 HOPE-X (全長およそ 13 m) のひずみ・温度分布計測と構造ヘルスモニタリングの適用を行っている[59-61]

図-33 はアメリカズカップ艇の製造中に設置された光ファイバひずみセンサである. 白い部分はセンサを保護しているシート状の CFRP である. これにより隔壁や甲板などとの結合前後の構造の変形をモニタリングすることが可能であった.



図-33 アメリカズカップ艇に設置された光ファイバ

図・34,35 は製造後の艇が設計段階での剛性を満たしているかどうかを検証したものであり、図・34 が有限要素解析による長手方向のひずみ、そして図・35 がBOTDR から得られたひずみ分布データを船体はり理論を用いて3次元情報に拡張したものである。これらの結果から、構造へルスモニタリングではCAD/CAEを有効に利用できることが理解できよう。これまでアメリカズカップ艇では100点近いひずみゲージを用いて計

測を行っていたので、分布型センサを使用することで 相当数の作業工程が減少し、また最新のアプリケーション技術により質の高い評価を可能にしたと言える.

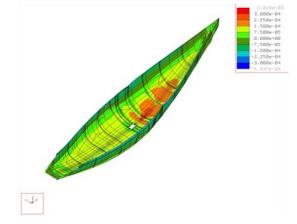


図-34 有限要素解析によるひずみ分布(長手方向ひずみ)

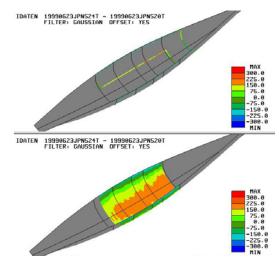


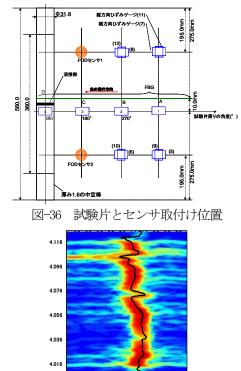
図-35 BOILRで計測された長手方向ひずみ分布の3次表示

(3) OFDR-FBGによる溶接部のひずみ分布モニタリング

OFDRによるFBGを用いたひずみ分布測定システムの溶接部のひずみのモニタリングへの適用性を検証することを目的とした研究を紹介する[62]. ゲージ長さが100 mmの長FBGセンサを用い、前述のOFDR手法を用いて、FBGセンサ内のひずみ分布を計測し、溶接継手部分ひずみ分布の時間的変化をモニタリンスしている.

溶接部分を有する炭素鋼鋼管に引張荷重を負荷し、溶接部近傍のひずみを測定することで溶接部分のひずみ分布のモニタリングを行っている. 試験片は、試験片中央部には溶接が施されている機械構造用炭素鋼 STMK13C 製の鋼管で、外径 31.8 mm、肉厚 1.6 mm、ゲージ長 360 mmである. 掴み部分は機械構造用炭素鋼鋼材で補強されている. ゲージ長さ 100 mm の FBG とひずみゲージを溶接線の上下各 5 mm の位置にそれぞれ貼り付けている. ひずみゲージは4つ試験片円周方向に均等に貼り付けた. また溶接部から十分はなれ応力状態が一定であると思われる位置にクロスゲージを両端2つずつ貼り付けた. 試

験片の寸法およびセンサー取り付け状況を図-36 に示す. なお, FBG は試験片の周方向に貼り付けてあるため, 試験片が引張荷重を受けると FBG には圧縮方向のひずみが生じることになる. 荷重 3 t のときのスペクトログラムと, その中心波長を重ね合わせた様子を図-37 に示す.



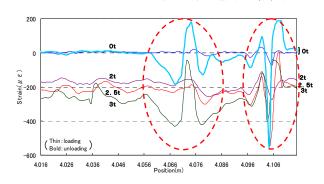


図-38 荷重を3tまで加えたときのひずみ分布の変化

次に、荷重を0t→2t→2.5 t→3t→0tと変化させた場合に、中心波長から求めたひずみ分布が変化する様子を図-38 に示す。丸で囲んだ部分は低荷重においてひずみは特異な変化を示し、その変化が除荷後にも残留していることがわかる。なお3tまで荷重をかけ、ひずみが急増した時には AE が検出され、溶接部に損傷が発生した。OFDRを用いたFBGによるひずみ分布測定手法を用いれば、溶接部近傍のひずみ分布を連続的に極めて高い空間分解能で測定ができ、負荷履歴に対応したひずみ分布の変化を検出できること、その変化から塑性変形あるいは損傷の発生を検出できる可能性を示した。

(4) DEFEWセンサによる複合材料の衝撃損傷評価

DEFEW センサは、周波数特性に優れるため、衝撃荷重を受ける材料の過渡応答を調べるには極めて都合の良いセンサである。また柔軟で高強度なので、試験片の変形に追従し、試験片が破壊してもセンサ機能を失わない。さらに形状がループ状なので、センサの中心部に衝撃荷重を加えることも可能である。CFRP 積層板の衝撃損傷評価に適用した事例[63]を紹介する。

試験片は、図-39 に示すような、長さ 150 mm、幅 50 mm、厚さ 2.3 mm の疑似等方積層 CFRP 板である. その中央部の上下面に直径 25 mm の円形ループセンサ (5 巻き) を貼付け、センサ中央部に落錘を衝突させた.

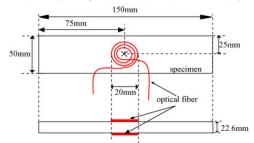


図-39 CFRP 衝撃試験片形状と DEFEW センサの配置

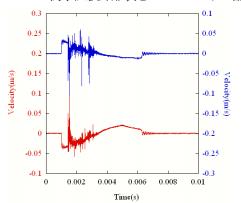


図-40 変位速度の時間履歴(上:下面,下:上面)

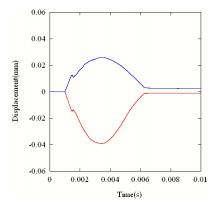


図-41 変位の時間履歴(上:下面,下:上面)

その時の試験片の衝撃変形挙動は、式(10)より変位速度として検出できる。検出された変位速度の時間変化を図-40に、それを時間軸で積分し変位に変換した結果を図-41に示す。

変位速度変化を表す図-40より、まず損傷に伴う顕著

な AE 波形が上面 (圧縮) 側で観察され、変位速度がゼロ近くなる最大荷重付近で、大振幅の AE 波形が下面 (引張) 側で観察されている。また変位に変換した図41 より、落錘の衝突による局所的変形のため、上面側の変位が下面側より大きいこと、変位速度波形で見られた顕著な AE 波形発生時には、変位一時間線図にも急激な低下が見られるなど、複合材料の衝撃損傷挙動解明のために有益なデータを得ることができた。

5.構造物の光ファイバセンシング

(1) RCコンクリート構造物に対するDEFEWを用いたAE計測RCコンクリート構造の供試体に対し、DEFEW光ファイバ振動センサネットワークを設置し、RCコンクリート構造物に亀裂が生じる際に発生するAEを計測した[64].本実験で用いた光ファイバセンサは図-42の供試体に対し、はね出し部付け根の亀裂発生想定個所近くに設置した。図-43にセンサ配置を示すが、設置個所は上面20点、下面5点の計25点である.

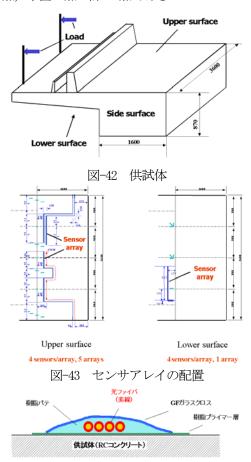


図-44 センサの敷設方法

本実験では、センサ設置後センサ上に積み上げる土嚢の荷重、及び、作業者の踏みつけ等の負荷に耐えられる施工法を検討し実施した。今回用いた敷設法は図-44 に模式的に示すように、素線の光ファイバセンサを供試体

に設置し、上から樹脂パテ及び GFRP (ガラス繊維強化 樹脂) にて保護したものを使用した.

荷重を加えて亀裂を進展させた際,エネルギーの大きな AE は、上面センサ、下面センサでほぼ同時に捉えることができた。図-45、図-46 に測定例を示す。この例では下面センサの波形から、P波とS波の時間差を読み取ることができ、AE が下面センサから 200mm の位置で発生したことがわかる。また、両センサに到達したS波の時間差から、両センサからの距離差が 200mm の位置で AE が発生したことがわかる。実際に供試体を観察すると、この位置に相当する場所に亀裂の先端がきており、亀裂の先端で発生した AE を捉えたものと思われる。

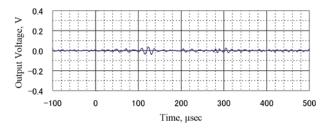


図-45 上面センサで検出した波形の例

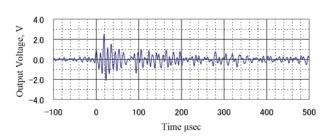


図-46 下面センサで検出した波形の例

当初設置した上面,下面のセンサ群では亀裂発生個所から距離があり,詳細な波形計測ができなかったので, 亀裂発生個所の近傍に新たにより高感度なタイプの光ファイバセンサを単体で設置して波形計測をした.この時に計測した代表的な波形を図-47~49に示す.

今回の実験で計測されたAE波の周波数帯域は、数10kHz~200kHzで、広い幅の周波数成分を持っているのが特徴であり、高周波成分を多く含むもの、低周波を多く含むものなどがあった。また、高周波成分は減衰が大きいため、遠方(300mm以上)で発生したAEは低周波のAE波として検出されている。

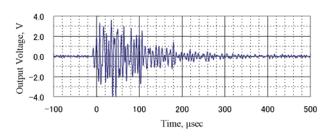


図-47 センサから約 50mm の位置で発生

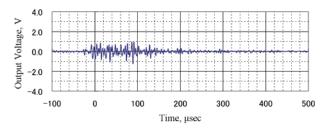


図-48 センサから約 100mm の位置で発生

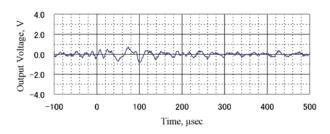


図-49 遠方(300mm以上)で発生

(2) DEFEWセンサによる橋脚の振動計測

図-50 に示すように、DEFEW 振動センサと箔ひずみ ゲージをコンクリート橋脚構造モデルに貼り付け、電気油圧式試験機により構造モデルに加振した。DEFEW センサで検出したひずみ速度は時間積分によってひずみ値に変換した。計測したひずみ時間履歴を DEFEW センサと箔ひずみゲージと比較して図-51 に示す。周波数はおよそ 4 Hz であるが、このように比較的低い周波数帯域においても、DEFEW センサは箔ひずみゲージと比較して、格段にノイズの少ない計測結果を与えている[65]。



図-50 コンクリート橋脚構造モデル

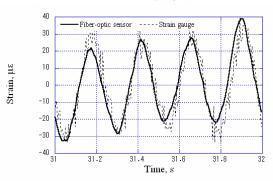


図-51 ひずみの時間履歴 (DEFEWセンサと箔ひずみゲージの比較)

(c) DEFEWセンサの岩盤分野への適用[66,67]

高さ75mm×幅25mm×奥行き25mmの花崗岩の岩石片を振動伝播の媒体とし、パルスジェネレータから矩形波(パルス波)を入力してPZT型センサを発振し、FODセンサとPZT型センサの両者でこの振動を受振して波形の最大振幅を比較した。図-52に示すように、発振用のPZT型センサを岩石片側面の中央部に瞬間接着剤で貼付し、受振用のFODセンサとPZT型センサをその対面の中央部にそれぞれ同じ方法で貼付した。PZT型センサは発振・受振ともに広帯域型より感度が良好な150k比の共振型センサ、FODセンサは30巻の真円形状である。

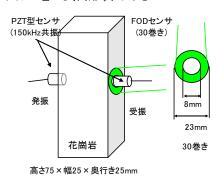


図-52 感度試験方法

図-53 に試験結果を示す. 同図の(a) は発振波形, (b) は FOD センサの受振波形, (c) が PZT 型センサの受振波形である. 図の横軸は時間(μ 秒), 縦軸は振幅値(V)である. 同図の(b) と(c) から両者の感度を比較すると, 両者とも最大振幅は $\pm 0.05V$ であり, ほぼ同程度の感度であることがわかる. また, 受振波形の継続時間も同程度である.

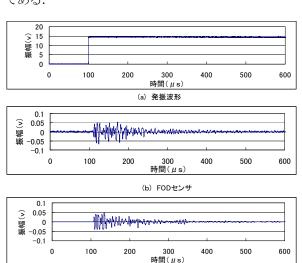


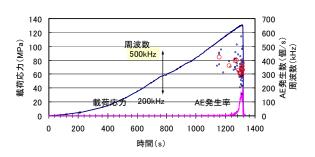
図-53 感度試験結果

(C) PZT型AEセンサ

高さ75mm×幅25mm×奥行き25mmの花崗岩に圧縮荷重を 負荷し、その時に発生するAEをDEFEWセンサと通常のPZT 型AEセンサで検出した. 載荷には最大荷重100kNの油 圧サーボ式疲労試験機を使用し、変位速度を0.5mm/min一定に制御して載荷を行った.

図-54 に花崗岩供試体の破壊に伴う AE 発生率(個/秒) と周波数(kHz)を示す. 同図(a)が DEFEW センサ, (b)が PZT センサで測定された結果である. 周波数は測定され た波形から FFT 解析を行い、横軸周波数、縦軸パワーの 図上にプロットされた FFT 解析結果の図から図の重心を 求め、その値を卓越周波数と考えた。 図-54 に AE 周波数 として小さな丸印で示した値は、この卓越周波数を発生 時刻順に 10 個ずつ平均した値である. まず図-54(a)の DEFEW センサの場合をみると、供試体の破壊は載荷開始 から 1300 秒経過後に 130MPa 付近で破壊している. AE は 破壊応力の 96% (125MPa) で急激に発生し始め, 1300 秒 で最大 200 個/秒の AE が測定されている. AE 波形の周波 数をみると、概ね 200~500kHz の範囲である. また大き な丸印は、小さな丸印を5個ずつ順次平均して求めた50 波形の平均周波数であるが、これをみると破壊が近づく に伴い周波数が低下する傾向が認められる.一方,図-54(b)の PZT 型センサの場合をみると、AE 発生頻度の変 化は DEFEW センサと同様な傾向であるが、最大発生数は 130 個/秒程度である. 周波数帯域は FOD センサと同様に 概ね 200~500kHz の範囲であり、小さな丸印を DEFEW セ ンサの場合の 2 倍の 10 個ずつ順次平均して求めた 100 波形の平均周波数も破壊が近づくに伴い低下する傾向が みられる.

以上より、両者で測定された花崗岩供試体の破壊に伴う AE 特性はほぼ同様な傾向を示しており、FOD センサはこの種の AE 測定に対して PZT 型センサと同程度の性能を有しているといえる.



(a) DEFEWセンサ 140 700 120 600 周波数 載荷応力(MPa) 100 500 500kH **●** ₹ 80 400 AE発生数(· 周波数(k 300 60 200 40 載荷広ナ 20 100 n 1000 600 800 1200 1400

(b) PZT型AEセンサ図-54 一軸圧縮試験結果

時間(sec)

6. 知覚を持つ複合構造への期待

ここで紹介したような、コストや量産性に優れ、熱可塑性樹脂系複合材料にみられるような環境調和性やリサイクル性も兼ね備えた繊維強化複合材料は、軽量で耐食性に優れるという特性を生かして、土木建築分野における複合構造への展開が大いに期待できる.

ただし,圧縮荷重を受けることの多い土木建築構造物の強度設計においては,繊維強化複合材料の圧縮特性について十分な配慮を払う必要がある.おおざっぱに言って,一方向繊維強化複合材料の繊維方向引張り強度 σ_{TL}^c は,繊維の引張り強度を σ_{TL}^f ,樹脂の強度(厳密には繊維の破断ひずみに相当するひずみにおける応力値)を σ_{TL}^m として次式で与えられる.いわゆる複合則である.ただし, V_f は繊維の体積含有率である.

$$\sigma_{TL}^c = V_f \sigma_{TL}^f + (1 - V_f) \sigma^m \tag{13}$$

しかし,圧縮荷重下における複合材料の強度発現メカニズムは,上記の複合則ではなく次式で与えられる. ただし, σ_{CL}^c は複合材料の圧縮強度, G_m は繊維のせん断弾性率である.

$$\sigma_{CL}^{c} = \frac{G_{m}}{1 - V_{\epsilon}} \tag{14}$$

つまり、繊維強化複合材料の圧縮強度は、強化繊維の強度ではなく、マトリックス樹脂の弾性率で決まるということである。本来単体では圧縮荷重を支えることのできない繊維に圧縮荷重を伝達しているのは、繊維の周りの樹脂が繊維を支えてマイクロバックリングを起こさないようにしているためであり、界面が弱かったり、弾性率が小さかったりしてマトリックス樹脂の繊維を支える力が弱いと、どんなに強い繊維をもってきても、圧縮強度が発現しない。構造部材としたときに示す、複合材料の曲げ荷重や圧縮荷重における奇妙な力学的ふるまいは、基本的にはこの2つの異なる強度メカニズムが同時に働いていることに起因することが少なくない。

著者は長年複合材料の力学特性に関する研究に従事してきたが、しばしば複合(材料)構造が見せる予想しなかったような強度特性に驚かされてきた。複合材料の教科書には、よくその異方性をとりあげて「複合材料は設計できる材料」であると書かれているが、その力学挙動を予測しにくいとうことは、つまり「設計しにくい材料」であることを示していることにほかならない。

光ファイバセンサなどのセンサを活用して、材料に知覚を与え、運用中の荷重や損傷の有無などをリアルタイムで評価できれば、高性能であるが「設計しにくい材料」である複合材料を土木・建築構造物をはじめいろいろな複合構造に安心して適用することが可能となる.

構造へルスモニタリング技術は、保守管理、延命など、すでにある既存の構造物や機器に適用されることが多いが、新材料をいろいろな構造物に積極的に適用していくための道具として知覚を持つ材料が活用される未来を一人の研究者として描いている.

7. 結言

繊維強化複合材料を中心とした新材料の開発動向,特に成形方法の新しい展開について紹介し,さらに光ファイバセンサの特徴と,近年における測定技術の進歩を概説した.さらに知覚化した複合構造の研究成果について事例を紹介し,これらの新技術を活用する方法として知覚を持つ材料の未来を描いてみた.

謝辞

DEFEW光ファイバセンサの開発及び適用事例については、(株)レーザック町島祐一ご提供の資料によることを記して、謝意を表したい.

参考文献

- Olsen Howard B, Automated composite tape lay-up using robotic devices, Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, v 3, pp. 291-297, 1993.
- [2] E. E. Hardesty, Design and construction of a large, fully automated tape placement machine for aircraft structures, Composites, Volume 3, Issue 6, pp. 248-253, 1972.
- [3] 青木義男,山下誠, CATIA V5 の適用業界と特徴,FRP CON-EX2006講演要旨集,2006.
- [4] Barnardon Ed, Fiber SIM, CAD integrated software tools for composite manufacturing and design, SAMPE Journal, v 34, n 4, pp. 33-39, 1998.
- [5] G. Marsh, Airframers exploit composites in battle for supremacy Reinforced Plastics, v 49, n 3, March, pp. 26-32, 2005.
- [6] Hodgkin, Jonathan H., New development in high-speed composite fabrication for aerospace, automotive, and marine applications Proceedings Int SAMPE Symp Exhib, v 45 (II), pp. 2274-2282, 2000.
- [7] K. Jackson, "Low Temperature Curing Materials: The Next Generation", SAMPE Journal, 34(5), pp. 23, 1998.
- [8] Domheim, Michael A, SpaceShipOne flies, Aviation Week and Space Technology v 158, n 21, pp. 74, 2003.
- [9] http://www.acg.co.uk/
- [10] 日本複合材料学会編,複合材料活用辞典、pp. 468-471,產業 調査会, 2001.
- [11] 織田政信, LCM 成形概論, 強化プラスチックス, Vol. 51, No. 11, pp.510-516, 2005.
- [12] Campbell, G. Scott, Vacuum infusion processing enhanced by new core material techniques, SAMPE Journal, v 41, n 1, January/February, pp. 54-56 2005
- [13] Li W., et al, Process and performance evaluation of the vacuum-assisted process, Journal of Composite Materials, v 38, n 20, pp. 1803-14, 2004.
- [14] Haberkem, Helge, Tailor-made reinforcements, Reinforced Plastics, v 50, n 4, April, pp. 28-33, 2006.
- [15] http://www.llb.mw.tum.de/Download/FVW/TUM_Schouten_Textiltech nik.pdf
- [16] http://www.structil.com/en/products/resins.html
- [17] Wittig, J.et al, Developments in robotic three-dimensional stitching technology for assembling composite performs, Materials Technology, v 16, n 1, March, pp. 14-19, 2001.
- [18] T. Kato, et al, Evaluation of material properties of advanced composites Zanchor CFRP laminates, Int. SAMPE Tech. Conference, pp. 13, 2005.
- [19] http://www.dieffenbacher.de/flash.html
- [20] J. Sumerak, "Pultrusion Gets Tough", CF Magazine, Vol20(2), p.16, 2004.

- [21] http://www.cyclics.com/
- [22] K. Liu, S. M. Ferguson and R. M. Measures, "Damage detection in composites with embedded fibre optic interferometric sensors", Proc. of SPIE, Vol. 1170, pp. 205-210, 1989.
- [23] K. Liu, S. M. Ferguson, K. McEwen, E. Tapanes and R. M. Measures, "Acoustic emission detection for composite damage assessment using embedded ordinary single-mode fiber-optic interferometric sensors", Proc. of SPIE, Vol. 1370, pp. 316-323, 1990.
- [24] A. M. Yurek, A. B. Tveten and A. Dandridge, "High performance fiber optic hydrophones in the arctic environment", Proc. of OFS'90, pp. 321-324 1990
- [25] E. Udd, Fiber Optic Smart Structures, John Wiley & Sons, 1995.
- [26] Health monitoring for airframe structural characterization, NASA/CR-2002-211428, 2002
- [27] H. Xiao, W. Zhao, R. Lockhart, J. Wang and A. Wang, "Absolute sapphire optical fiber sensor for high-temperature applications", Proc. of SPIE, Vol. 3201, pp. 36-42, 1998.
- [28] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication", Appl. Phys. Lett., Vol. 32, No. 10, pp. 647-649, 1978.
- [29] G. Meltz, W. W. Morey and W. H. Glenn, "Formation of Bragg grating in optical fibers by a transverse holographic method", Opt. Lett., Vol. 14, No. 15, pp. 823-825.
- [30] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam and E. J. Friebele, "Fiber Grating Sensors", J. Lightwave Technol., Vol. 15, No. 8, pp. 1442-1463, 1997.
- [31] E. Udd, W. Schulz, J. Seim and M. Morrell, "Fiber optic distributed sensing systems for harsh aerospace environments", Proc. of SPIE, Vol. 3674, pp. 136-147, 1999.
- [32] 井川寛隆, 太田圭一, 葛西時雄, 山口功, 村山英晶, 影山和郎, OFDR を用いた長ゲージ FBG による分布計測の研究(第1報, 光学シミュレーションモデルを用いた検討), 日本機械学会論文集 A 編, 第72巻, 第724号, pp. 1912-1920, 2006.
- [33] B.A. Childers et al, "Use of 3000 Bragg grating strain sensors distributed on four eight-meter optical fibers during static load tests of a composite structure", Proc. Of SPIE, Vol.4332, pp. 133-142, 2001.
- [34] J. Dakin and B. Culshaw, Optical Fiber Sensors (Vol.4), Artech House, 1997.
- [35] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics (2nd Ed.), Academic Press, 1995.
- [36] T. Horiguchi, T. Kurashima and M. Tateda, IEEE Photonics Tech. Lett., Vol. 1, No. 5, pp. 107-108, 1989.
- [37] D. Culverhouse, F. Farahi, C. N. Pannell and D. A. Jackson, Electron. Lett., Vol. 25, No. 14, pp. 913-915, 1989.
- [38] T. Kurashima, T. Horiguchi, M. Tateda and Y. Koyamada, Technical Digest of CLEO, CThN5, pp. 416-417, 1991.
- [39] K. Shimizu, T. Horiguchi, Y. Koyamada and T. Kurashima, J. Lightwave Technol., Vol. 12, No. 5, pp. 730-736, 1994.
- [40] A. Fellay, L. Thévenaz, M. Facchini, M. Niklès and P. Robert, Proc. OFS-12, pp. 324-327, 1997.
- [41] H. Naruse and M. Tateda, Appl. Opt., Vol. 38, No. 31, pp. 6516-6521, 1999.
- [42] 保立和夫、コヒーレンス関数の剛性による高空間分解能分布型光ファイバセンサ、レーザー研究、第33巻、第9号、pp. 571-576, 2005.
- [43] K. Hotate and T. Hasegawa, IEICE Trans. On Electron, E83,pp. 405, 2000
- [44] K. Hotate and M. Tanaka, SPIE OE Magazine, 11, pp.36, 2001.
- [45] K. Hotate and N. Tanaka, IEICE Trans. On Electron, E84, pp. 1823, 2001.

- [46] K. Hotate and M. Tanaka, IEEE Photon. Tech. Lett., 14, pp. 179, 2002.
- [47] M. Tanaka and K. Hotate, IEEE Photon. Tech. Lett., 14, pp. 677, 2002.
- [48] 保立和夫、痛みのわかる材料・構造のための光ファイバ神 経網技術、計測と制御、第46巻、第8号、pp. 591-598.
- [49] http://www.kajima.co.jp/news/press/200603/30c1fo-j.htm
- [50]小川勝徳, 小沢保夫, 川神祐志, 筒井輝明, 山本哲, 応用 物理学会・光波センシング技術研究会論文誌, LTS3-21, pp. 141-147, 1989.
- [51] J. A. Bucaro and T. R. Hickman, Applied Optics, Vol. 18, No. 6, pp.938-940, 1979.
- [52] T. G. Giallorenzi, et al., IEE J. Quantum Electro. Vol. QE-18, No. 4, pp. 626-665, 1982.
- [53] K. Kageyama, et al., Proc. 4th International Workshop on Structural Health Monitoring, pp.1150-1157, 2003.
- [54] K. Kageyama, H. Murayama, K. Uzawa, I. Ohsawa, M. Kanai, Y. Akematsu, K.Nagata and T. Ogawa, "Dopplwe Effect in Flexible and Expandable Light Waveguide and Development of New Fiber-Optic Vibration/Acoustic Sensor, J. Lightwave Technol., Vol. 24, No.4, pp. 1768-1775, 2006.
- [55] K. Kageyama, et al, Smart Mater. Struct, Vol. 14, pp. S52-S59, 2005.
- [56] 松尾, 他 5 名, 第 29 回複合材料シンポジウム講演要旨集, 日本複合材料学会, pp. 137-138, 2004.
- [57] 影山和郎, 非破壊検査, 第 52 巻 4 号, pp. 174-177, 2003.
- [58] 松尾剛, 影山和郎, 村山英晶, 大澤勇, 金井誠, 鵜沢潔, 日本複合材料学会 2 0 0 4 年度研究発表講演会予稿集, pp. 139-140, 2004.
- [59] 村山英晶, 影山和郎, 成瀬央, 島田明佳, 鵜沢潔, 光ファイバセンサによる大型複合材料構造のヘルスモニタリング, 日本複合材料学会誌, vol. 28, no. 5, pp. 176-188, 2002.
- [60] H. Murayama, K. Kageyama, H. Naruse, A. Shimada and K. Uzawa,

- Application of Fiber-Optic Distributed Sensors to Health Monitoring for Full-Scale Composite Structures, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.14, No.1, pp. 3-13, 2003.
- [61] H. Murayama, K. Kageyama, H. Naruse, A. Shimada, Distributed Strain Sensing from Damaged Composite Materials Based on Shape Variation of the Brillouin Spectrum, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol.15, No.1, pp.17-25, 2004.
- [62]小原康平,村山英晶,影山和郎,金井誠,鵜沢潔,大澤勇,井川寛隆,畦本雅宏,光ファイバセンサによる溶接部のひずみ分布モニタリング,日本船舶海洋工学会 H19 年春季講演会,2007.
- [63]武田真一,秋山暁,村山英晶,杉本直,影山和郎,光ファイバ振動センサによる CFRP 積層板の衝撃損傷モニタリング,第49 回構造強度に関する講演会講演集,pp. 12-14,2007.
- [64] K. Kageyama, H. Murayama, I. Ohsawa, M, Kanai, K. Nagata, Y. Machijima, F. Matsumura, Acoustic Emission Monitoring of a Reinforced Concrete Structure by Applying New Fiber-Optic Sensors, Smart Materials and Structures, Vol. 14, pp. S52-S59,2005.
- [65] K. Kageyama, H. Murayama and K. Uzawa, "A New Fiber-Optic Acoustic/vibration sensor-characteristics and Application to civil structural Health Monitoring", Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring, pp. 443-452, Springer, 2005.
- [66] 田仲他,新しい光ファイバ振動センサの岩盤工学分野への 適用性に関する基礎的検討;第34回岩盤力学に関するシン ポジウム,2005.
- [67] T. Mori, M. Nakajima, K. Iwano, M. Tanaka and S. Kikuyam, "Application of the Fiber Optical Oscillation Sensor to AE Measurement at the Rock Compression Test", Proceedings of 11th Inter. Congr. Rock Mech., pp. 1101-1104, 2007.

PERCEPTUAL MATERIALS APPLIED TO COMPOSITE STRUCTURES

Kazauro KAGEYAMA, Hideaki MURAYAMA and Kiyoshi UZAWA

Applicability of composite materials to structural members depends on their productivity and issue of cost. New composite fabrication process, which results in productivity improvement and low-cost production, are reviewed in this present paper. Principles and methods of fiber-optic sensors are reviewed. Advantage and availability of DEFEW and OFDR-FBG sensors, which have been developed by the authors, are highlighted. Combination of new composite material systems and fiber-optic sensor brings out new perceptual materials or smart materials/structures. Examples of perceptual materials and structure systems developed by the authors are introduced. Future of composite and perceptual material system is investigated.