

千葉工業大学
博士学位論文

社会インフラのヘルスマモニタリングに
適用可能な光ファイバセンシングに関
する研究

Study on optical fiber sensing applicable to health
monitoring of social infrastructure

2021 年 3 月

松田 健太郎

目次

第1章 序論.....	1
1.1 社会インフラの老朽化問題.....	1
1.2 持続可能なメンテナンスの実現について.....	6
1.3 光ファイバ通信技術及び光ファイバセンシング技術の関係.....	9
1.3.1 光ファイバの登場から光通信の発展について.....	9
1.3.2 光ファイバセンシングについて.....	10
1.3.3 光ファイバセンサを用いたモニタリングシステムの実例.....	13
1.4 本論文の目的及び構成.....	16
第1章の参考文献.....	19
第2章 誘電体多層膜を用いた光ファイバセンサによる構造体のAE波検出の検討.....	22
2.1 はじめに.....	22
2.2 BOFセンサのアセンブリ及び特性について.....	23
2.2.1 BOFセンサについて.....	23
2.2.2 BOFセンサの反射スペクトルについて.....	24
2.3 荷重変化に対する反射スペクトルシフトについて.....	26
2.4 BOFセンサの周波数特性.....	31
2.5 破壊試験における炭素繊維複合材のAE波測定.....	33
2.5.1 炭素繊維複合材試験片について.....	33
2.5.2 3点曲げ破壊におけるAE波検出.....	35
2.5.3 層間剥離におけるAE波検出.....	38
2.5.4 落錘衝撃負荷における炭素繊維複合材のAE波検出.....	40
2.6 破壊試験におけるコンクリートのAE波測定.....	42
2.6.1 コンクリート試験片の作成について.....	42
2.6.2 3点曲げ破壊におけるAE波検出.....	42
2.7 第2章のまとめ.....	44
第2章の参考文献.....	46
第2章に関連する学会発表および論文.....	47
第3章 標準SMFを用いた簡易ひずみセンサの構造設計.....	51
3.1 はじめに.....	51
3.2 曲率変化による光損失変動, 信頼性, 偏波依存損失について.....	52
3.2.1 光ファイバの曲がり部信頼性について.....	52
3.2.2 曲率変化による光損失変動について.....	55
3.2.3 曲げによる偏波依存損失について.....	57
3.3 光ファイバ型ひずみセンサの設計.....	61

3.3.1	光ファイバ型ひずみセンサの設計.....	61
3.3.2	光ファイバ型ひずみセンサの荷重測定及び偏波依存損失の影響...	65
3.4	光ファイバ型ひずみセンサを用いたひずみ測定への応用.....	67
3.5	第3章のまとめ.....	68
第3章	第3章の参考文献.....	70
第3章	第3章に関連する学会発表および論文.....	71
第4章	分岐光線路による遠隔保守監視の構築.....	72
4.1	はじめに.....	72
4.2	分岐光線路による監視システムの構築.....	73
4.2.1	レイリー散乱光測定方法について.....	73
4.2.2	分岐光線路上におけるレイリー散乱光の理論式.....	74
4.3	差分損失変動の検証実験.....	76
4.3.1	シミュレーション及び実験による差分損失変動の検証.....	76
4.3.2	差分損失変動量の調整及び検証.....	77
4.4	差分損失から挿入損失の求め方.....	80
4.4.1	挿入損失の求め方.....	80
4.4.2	挿入損失特定理論の検証実験.....	81
4.5	レイリー散乱光を用いた損失測定の限界.....	82
4.6	光ファイバ型ひずみセンサ, BOFセンサを用いた同時測定の展望.....	83
4.7	第4章のまとめ.....	85
第4章	第4章の参考文献.....	87
第4章	第4章に関連する学会発表および論文.....	87
第5章	結論.....	88
謝辞	90

第1章 序論

1.1 社会インフラの老朽化問題

高度経済成長期に整備された道路、橋梁、トンネルなどの社会インフラ設備は建設後 50 年経過したものが多く、インフラ設備の老朽化が問題視されている⁽¹⁻²⁾。インフラ関連に使用されているコンクリートの耐久年数は 50~100 年と言われているが⁽³⁻⁴⁾、塩害やコンクリートに使用された砂利によるアルカリ骨材反応（当初アルカリ性を含む細骨材について言及されていない時代に多く使用されていた）などが内部の鉄筋を腐食させ、コンクリートの劣化を促進させていることから耐用年数は 50 年程度と言われている。

橋梁・トンネルの建設年数の推移を図 1.1 に、ミネアポリス崩落事故及び笹子トンネル崩落事故を図 1.2 に示す。インフラ設備の維持管理を行うようになったきっかけとして、次の事故例がある。図 1.1 に示すように、アメリカでは日本より早くコンクリートを用いたインフラ整備が行われてきたが⁽⁵⁾、1967 年にウエストバージニア州とオハイオ州を結ぶシルバー橋が、橋の基礎構造である吊り鉄板チェーンの老朽化による欠損崩落により死傷者を出す被害をもたらした。この事故以降橋梁の点検が強化されたものの、十分な維持管理が行われていないため、1980 年以降に全米各地で多くの橋梁、道路が経年劣化により通行止めが多発した。また、2007 年にミネソタ州のミネアポリス高速道路が供用中に崩落し、多数の死傷者を出す被害をもたらした⁽⁶⁾。インフラ関連の事故は日本でも同様の事故が起きている。1999 年山陽新幹線福岡トンネル内において、コンクリート内壁の一部が剥離し、走行中の列車に衝突する事故が発生した。この事故において死傷者を伴う重大事故には至らなかったが、同様の事故が今後起こる懸念から 2003 年にインフラ関連の管理・更新の在り方が提言された。しかし、リスク管理の甘さにより 2012 年に中央自動車道笹子トンネル内において、コンクリート製の天井板が約 158 m にわたり落下、死傷者を出す重大な事故を引き起こした⁽⁷⁻⁸⁾。

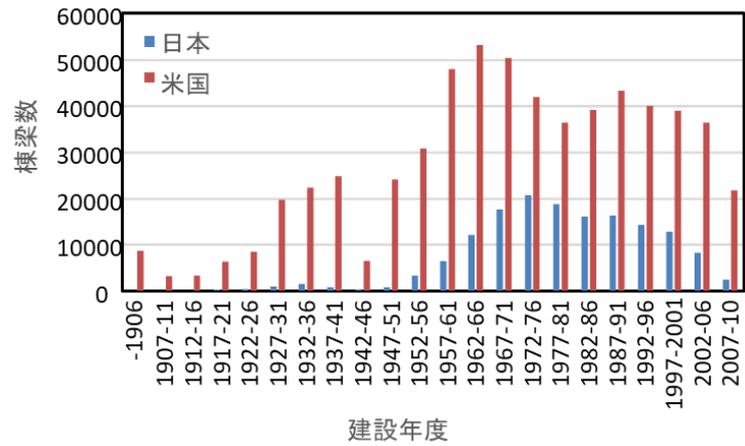
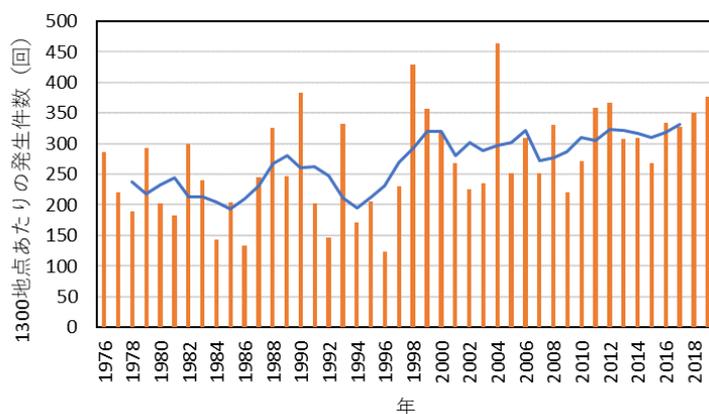


図 1.1 橋梁・トンネルの建設年数の推移⁽⁵⁾

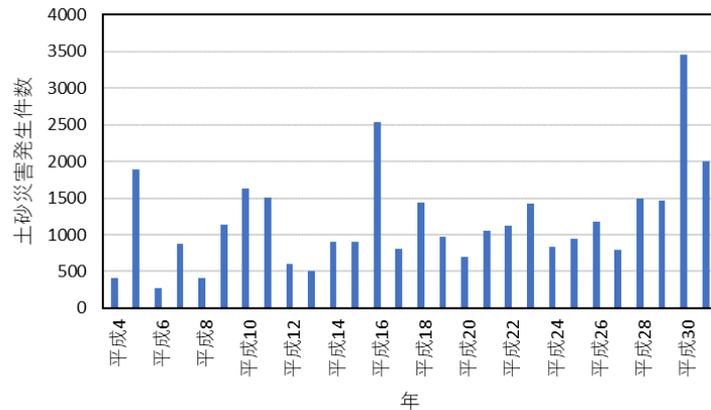


図 1.2 崩落事故例 (上：ミネアポリス高速道路⁽⁶⁾, 下：笹子トンネル⁽⁸⁾)

また、老朽化による被害だけでなく、自然災害（豪雨や地震）による被害も多発している。地球温暖化に伴って日本の平均気温は上昇傾向にあり、日本国内約1300ヶ所に設置している地域気象観測所（アメダス観測所）による観測では、1時間に50mm以上超える大雨の年間発生回数は増加傾向にある。この大雨の発生件数増加に伴い、土砂災害発生件数も増加傾向にある。日本は地形、地質、気象などの面で厳しい条件下にあり、国土の約7割を山地・丘陵地が占めていることから集中豪雨が起きると、雨水の浸透により地盤がゆるみ、がけ崩れや、斜面の一部が下方に移動する地滑り、山腹の川底の石、土砂が一気に下流へ押し流す土石流が発生しやすい傾向にある⁽⁹⁻¹¹⁾。また、河川は急勾配であり、山から海へと一気に流下することから平野地域での河川の氾濫により住宅地の浸水、下水道の排水処理を超える雨量による冠水などがここ数年多く発生し、河川水位より低い土地などに人口や資産が集中していることから被害を受けやすい状況下にある。2014年8月に広島市安佐南区において、1時間の降水量が101mmという観測史上最大の豪雨が発生し、住宅地付近に大きな被害を与えた⁽¹¹⁾。また、2015年9月に発生した大雨は茨城県常総市鬼怒川の堤防が決壊し、2万棟近くの住居が内水による被害を受けている⁽¹⁰⁾。年間降水量を図1.3に、土砂災害発生件数を図1.4に示す。



1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数の推移⁽¹²⁾



土砂災害発生件数の推移（H4～R1）⁽¹²⁾

その他にも地震が発生すると、山岳地帯のがけ崩れや地滑り等の災害だけでなく平野地帯での建物の倒壊、地割れ等が発生し、我々の生活に多大な被害をもたらしている⁽¹³⁻¹⁴⁾。1954-73年の高度成長期において多くの建物は震度5強の地震では倒壊しない程度の耐震基準で建設したものが多く、1978年に発生した宮城県沖地震（M7.4：震度5強）により建設した建物の多くは倒壊する被害があった⁽¹⁵⁾。その経験から1981年と2000年に耐震基準が厳格化されたが、新耐震基準で建設した建物でも1995年の阪神淡路大震災、2011年の東日本大震災や熊本地震のようなM7を超える大地震やその後の余震により倒壊する建物が多くあった⁽¹⁵⁻¹⁹⁾。以上のことからインフラの老朽化に対する維持管理、更新、関連する技術開発の推進が行われている。建設後半世紀経過したインフラ（特に橋梁やトンネル）の老朽化は急激に進んでおり、10年後には約6割に増加することが報告されている⁽²⁰⁾。2014年から行われた一巡目の点検において、次回の点検までに措置を講ずべき割合は約1割存在する。また、国土交通省が所轄する社会資本は市町村管理の割合が多く、2018年までに着手したインフラは約20%程度にとどまっている。建設後50年以上経過する社会資本の割合を図1.5に示す。

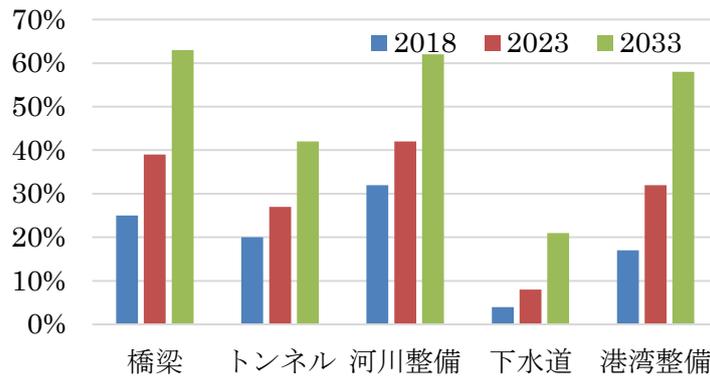


図 1.5 建設後 50 年以上経過する社会資本の割合⁽²⁰⁾

修繕措置の遅れの要因として、市町村の土木部門の職員数と土木予算の減少、修繕費の負担増加が挙げられる⁽²⁰⁻²³⁾。インフラ管理を行う土木部門の職員数は 2004 年より約 20 %減少しており、技術職がない市町村の割合は約 3 割に上る。維持管理・更新業務を担当する職員は人口規模が小さくなるほど顕著になり、巡視・点検の実施ができない、点検マニュアルに基づいていない例が報告されている。また、土木費においても 1993 年より減少傾向が続き、ピーク時に比べ約 50 %以上減少している。今後の維持管理・更新を事後保全方式で行った場合、2 倍以上の費用が必要となるため、老朽化対策を計画的・効率的に実施するための支援が必要となる。現在、市町村における持続的な社会資本メンテナンス体制の確立が行われている。市町村の土木部門職員の推移を図 1.6 に、市町村の土木予算の推移を図 1.7 に示す。

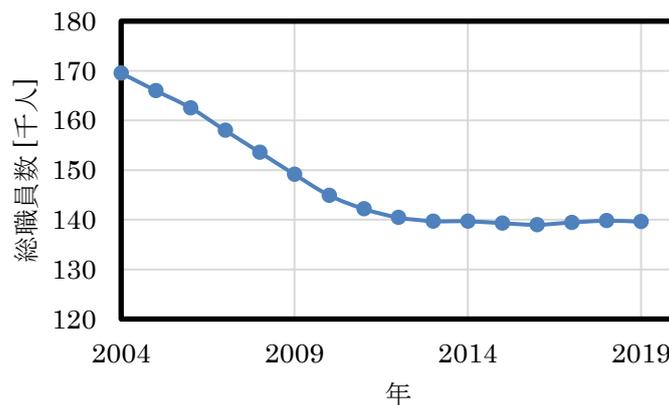


図 1.6 市町村における土木部門職員数の推移⁽²¹⁾

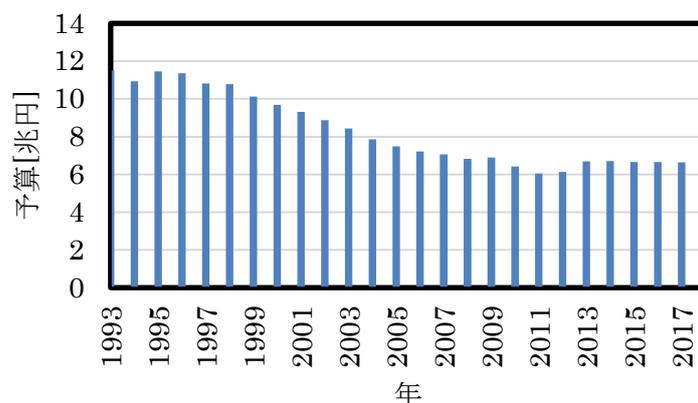


図 1.7 市町村における土木予算の推移⁽²²⁾

1.2 持続可能なメンテナンスの実現について

笹子トンネル崩落事故を契機にインフラ設備の点検補修を本格的に行われているものの、インフラ管理を執り行っている市町村の土木部門の職員数や費用の減少、事後的な管理方式による予算増加などの問題があり、社会インフラの修繕が追い付いていない状態にある。今後、増え続ける老朽化したインフラ管理を行うためには計画的・効率的に実施するための支援が必要である。その支援の一環として、国土交通省は社会インフラに対して次の方策を提言している⁽²⁴⁾。

1. 予防保全を前提としたメンテナンス
2. 新技術の導入による長寿命化・コスト縮小
3. 過載荷撲滅に向けた取り組みの強化
4. 集約化・撤去による管理施設の削減
5. 適正な予算の確保
6. 地方への国の関わり方

ここでは6項目のうち、本研究の背景に当たる(1)と(2)について論ずる。まず、(1)の予防保全を前提としたメンテナンスはインフラ環境を踏まえ定期的に点検などを行い、最小の修繕費用かつ高い健全性の確保を行う方針である。インフラの診断における健全度は表 1.1 に示すように設定されている。従来の事後保全型管理では診断結果がステージⅢあるいはⅣの状態と判断された場合、図 1.8 に示すようにステージⅠの状態になるまで修繕を行うが、修繕費用が高コストである。予防保全型はインフラの診断結果がステージⅡと判断されたとき、ステージⅠまで修繕を行うものであり、メンテナンスサイクルが事後保全型に比べ多くなるが、修繕にかかる費用は 1/4 から 1/25 程度に抑えることができ、基準類の

充実や新技術の導入等を行うとさらにコストが縮減することが可能である。

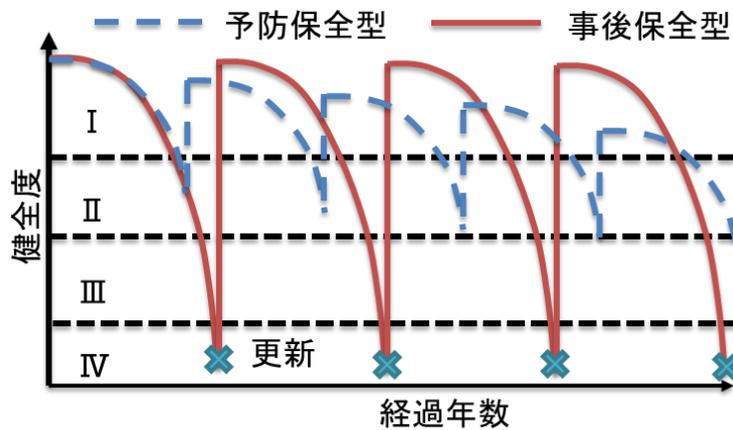


図 1.8 インフラのメンテナンスサイクル

表 1.1 インフラの健全度区分

区分		状態
I	健全	機能に支障が生じていない
II	予防保全段階	機能に支障が生じていないが措置を講ずるのが好ましい
III	早期措置段階	機能に支障が生じる可能性ある
IV	緊急措置段階	機能に支障が生じる可能性が極めて高い、もしくは支障が生じている

次に(2)の新技術の導入による長寿命化・コスト縮小は長寿命化を実現するために維持管理に配慮した設計基準，点検結果を踏まえた基準類の見直しなどや，新技術による効率的・効果的なメンテナンスを実現するために IT モニタリングを活用した維持管理，新技術の評価・普及などを行う。維持管理に配慮した設計基準，点検結果を踏まえた基準類の見直しについては現在，設計基準・点検要領の改訂が行われているため，これまでの補修・補強に関する基準類や，長期化保証契約の拡大などが検討されている。また，IT モニタリングによる維持管理は供用後 5 年程度における劣化の状況を診断することや，補修・補強後の対策の持続性や耐久性向上を確認することにより，長期にわたる運用に向けた適切な処置を行う取り組みが進行している。具体的な例としてコンクリート桁の塩害の進行の確認や，光ファイバセンサを用いてひび割れの進展を確認する取り組みが行われている。

光ファイバは石英ガラスやプラスチックで繊維状に形成される細いケーブルを示し，光が導通するコアとその周囲を覆うクラッドから構成される。この 2 つはガラスやプラスチックのような誘電性の無い物質を使用している。クラッド

はコアと比較し屈折率が低く設計 (0.2~3.0%) されており、光を全反射によりコア内に閉じこめ、長距離を伝搬するものである。このことから一般的なケーブルに比べてノイズなど電磁波の影響を受けず、長距離伝送でも伝送損失が少ないことから 1985 年に日本縦貫光ファイバケーブルルートが完成し、北海道旭川から九州鹿児島まで太平洋側の主要都市間や、海底ケーブルなどの通信分野に広く普及している。雷の影響により発生する過渡的な異常大電流の恐れがないことから防爆が求められる特殊環境下での計測に適していると考えられている。また、センサ以外の付帯設備は必要がないためシステムとしても安いことも挙げられる。光ファイバセンシングの最大のメリットとして観測所から測定場所まで光ファイバのみで構成することが挙げられる。電気式センサを用いて遠隔保守監視を行う場合、電磁ノイズの影響をなるべく抑えるために測定対象から 100 m 程度の場所にセンサ信号変換装置や情報伝達装置などの制御 BOX を設置し、これらを動かすための電源を確保する必要があるが、落雷による停電や水害による装置の破壊が生じる危険がある。しかし、光ファイバは現地でセンサを駆動するための電源や情報伝達の設備を必要とせず、観測所が致命的なダメージ（地震による倒壊）を受けない限り、測定対象の情報を得ることができる。光ファイバによる遠隔測定システムを図 1.9 に示す。

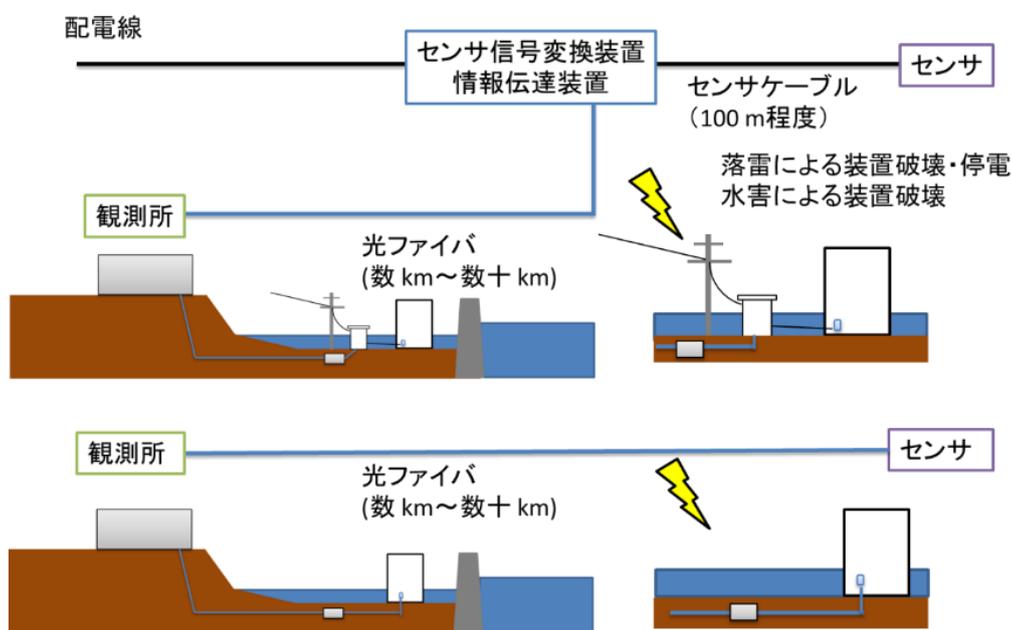


図 1.9 遠隔測定システム（上：電気式センサ，下：光ファイバセンサ）

1.3 光ファイバ通信技術及び光ファイバセンシング技術の関係

1.3.1 光ファイバの登場から光通信の発展について

光ファイバは 1960 年に C. K. Kao 氏がガラスの不純物濃度を低減し、伝送損失を 20 dB/km 程度にすることで通信用の光ファイバに用いることができると提案したことから始まり⁽²⁵⁾, 1970 年代に米国のコーニング社⁽²⁶⁾, Bell 研究所⁽²⁷⁾, 日本電信電話(現: NTT)が石英型光ファイバを作製した。1980 年代には大量生産技術が確立し、日本では 90%, 世界各国で 60%以上使用されている⁽²⁸⁾。

そのほかにも半導体レーザもダブルヘテロ接合構造半導体レーザによる室温連続発振に成功を成し遂げ、70 年代では 0.8 μm の波長を用いて研究がされ、1.31 μm や 1.55 μm 帯の半導体レーザも登場した。最初に登場した Fabry-Perot (FP) 型半導体レーザは各種半導体レーザの中でも最もシンプルで複雑なプロセス無しに、安価に製造できる利点があることから、比較的低速で短距離の光ファイバ通信システムで今日でも広く使われている。また、長距離で大容量な光ファイバ通信システムには、単一波長で発振する半導体レーザが要求され、波長選択性の強い回折格子を形成した分布帰還 (DFB: Distributed Feed Back) 型半導体レーザが使用されている。1980 年代以降はファイバ製造技術と半導体レーザの性能が向上し、1983 年に世界初の単一モード光ファイバ伝送方式が商用化され⁽²⁹⁾, 1985 年に総延長 3400 km の日本縦貫ルートが開通した。光ファイバ通信技術の進展を表 1.2 に示す。

表 1.2 光ファイバ通信技術の進展⁽²⁵⁻³³⁾

	1960	1970	1980	1990	2000	2010
製造技術		OVD MCVD	VAD			
光ファイバ	光ファイバ 提案	MFF SMF				
光コネクタ		Biconic 形 FC 形	SC 形 MT 形	MU 形 MPO 形		MCF MMCF
通信システム			TDM	WDM	デジタルコヒーレント	空間多重
半導体レーザ		GaAlAs 系 半導体レーザ				
通信容量			32 M - 1.6 G	10 G	2.4 G(WDM) 40 G(DWDM)	118 T

1.3.2 光ファイバセンシングについて

光ファイバセンシング技術は光ファイバ通信技術が発達すると共に新たなセンサが登場している。1970年代に光ファイバそのものをセンサとして活用する分布型の Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) が登場した。OTDR は元々同軸ケーブルの保守点検に用いられていた TDR 技術を応用したものである。当初は光ファイバ内の破断点特定の検出を目的に研究がされていたが、ファイバ内の密度の揺らぎにより引き起こされるレイリー後方散乱光の測定が可能であることが報告され⁽³⁴⁾、光ファイバの特性を評価することができるようになった。

また、レイリー散乱は光ファイバの各部分の損失に依存するため、光ファイバの分布測定が行うことができる。光ファイバに発生する散乱光にはレイリー散乱以外にラマン散乱、ブリルアン散乱が存在する。ラマン散乱は石英分子の格子振動とエネルギーの授受を行うことで入射光の波長がシフトするものであり、温度により大きく変化する特性を有している。しかし、光強度は非常に微弱であるため光パルスを多く入射させ、平均化処理を行う必要があり、後に登場したブリルアン散乱を用いた測定が主流となりつつある。ブリルアン散乱はラマン散乱と似ているところはあるが、ラマン散乱に比べて周波数変化の幅が大きい。また、ブリルアン散乱は温度だけでなくひずみにも依存するため、ラマン散乱より用途は広がる。ブリルアン散乱を活用した分布測定は入射光パルスに対する自然散乱を時間分布測定 (BOTDR) する以外にも、光源側に周波数変調を用いて参照光との干渉を制御することで位置を特定する相関領域方式 (BOCDR)、ファイバ双方から対向伝搬させ誘導散乱を活用し、解析を行う (BOTDA, BOCDA)⁽³⁵⁾などの測定手法が存在する。各散乱光の波長スペクトラムを図 1.9 に示す。

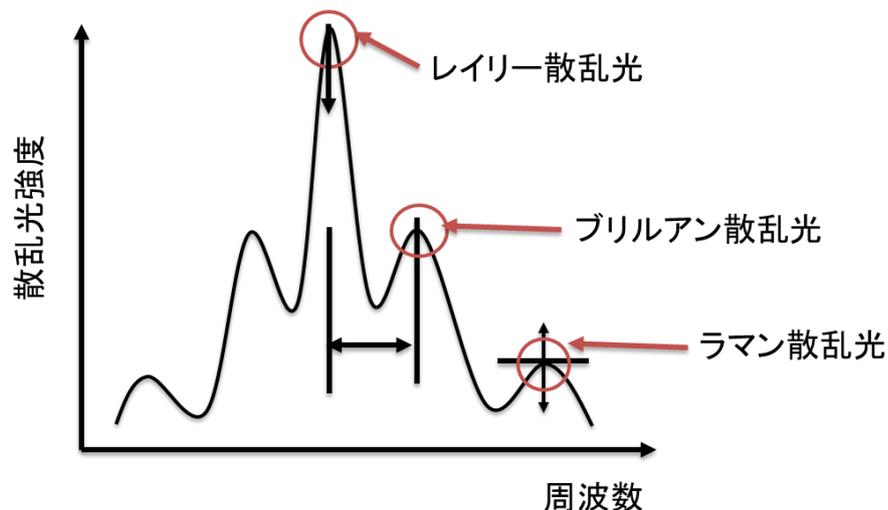


図 1.9 各散乱光の波長スペクトラム

光干渉方式は、ファブリ・ペロー干渉計、マイケルソン干渉計、マッハツェンダ干渉計の 3 種類が存在するが、光ファイバセンシングではファブリ・ペロー干渉とマイケルソン干渉を用いた方式が主に研究されている⁽³⁶⁾。ファブリ・ペロー干渉計は 2 つの反射面から構成され、反射面は空隙によって分離されている。同一光源からの光が異なる光路を通ったのちに重なるとき干渉光が生じるが、光路差の波長オーダーの変化に対して干渉光強度は変化するため、微小な変位や表面の凹凸など、様々な観測に干渉計が利用されている。垂直に入射した光が間隙を持つ二つの反射面により繰り返して反射が発生し、複数の反射光が干渉する多光束干渉となり、間隙の変化を透過光強度及び反射光強度の変化として測定できる。センサに光を入射すると 2 つの反射面間で干渉し、反射スペクトルに一連のピークが生成される。反射スペクトルは反射面間の変化に伴って変化する。反射スペクトルのピーク間が狭いほど分解能の高い測定が可能となる。マイケルソン干渉計はファブリ・ペロー干渉計と同様に一般的な干渉法であり、光を 2 つの経路に分割し、反射させた光と合流させることで干渉させる方法である。これを光ファイバで行う場合は図のように光カプラを用いて行う。片側はリファレンスとして用いるため、様々な要因を排除し、変化がない状態にする。もう片側に測定による変化を与えることでセンシング、リファレンス間に光路差が生じ、これらを再びカプラで合波させることで干渉を発生させる。光干渉センサを図 1.10 に示す。

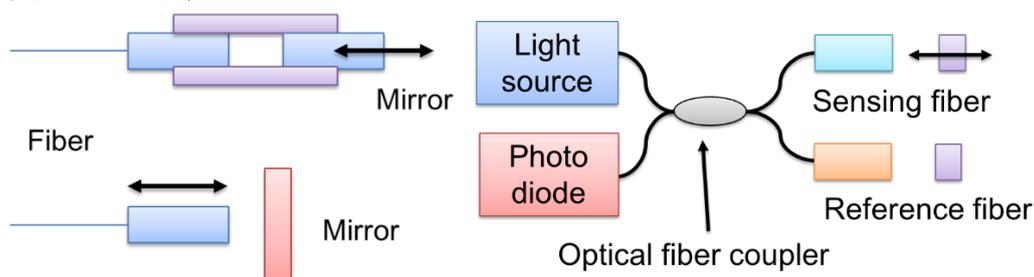


図 1.10 光干渉センサの構成

1980 年代ころにファイバブラッググレーティング (FBG) が登場した⁽³⁷⁾。FBG は Ge を添加した光ファイバコアに紫外光の干渉光を照射することで、コアの屈折率が上昇する。回折格子の距離、屈折率を調整することで選択した波長を反射あるいは透過する特性を有しているため光信号のフィルタとして WDM に使用する研究がされていたが、アレイ導波路回折格子 (Arrayed waveguide gratings: AWG)⁽³⁸⁾の登場により光ファイバ通信では使用されなくなった。Er 添加光ファイバアンプは $1.53 \mu\text{m}$ 付近にゲインピークがあり、自然励起光 (Amplified spontaneous Emission : ASE) が自然増幅し、信号光の増幅利得の制限や S/N(signal-noise)比の劣化を招くため、広帯域グレーティングフィルタを用いて ASE 光伝搬

の S/N 比劣化を抑制することに使用されている。また、切断、溶接に使用される高出力ファイバレーザの内部に組み込まれている⁽³⁹⁾。FBG は外部応力により格子間隔が変動する特性を利用することでストレインゲージのようなひずみセンサとして使用することができるので、FBG を用いた光ファイバセンシングの研究や実用化が様々な所で行われている⁽⁴⁰⁾。FBG の構造、機能を図 1.11 に、光ファイバセンシング技術一覧を表 1.3 に示す。

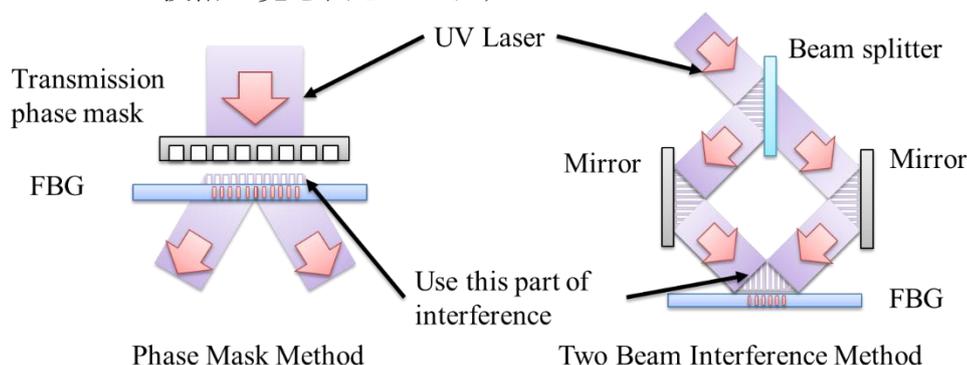


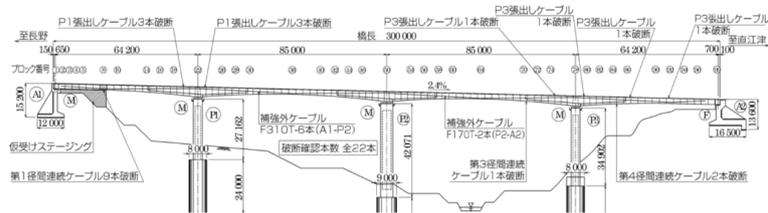
図 1.11 FBG の構造と機能

表 1.3 光ファイバセンシング技術一覧

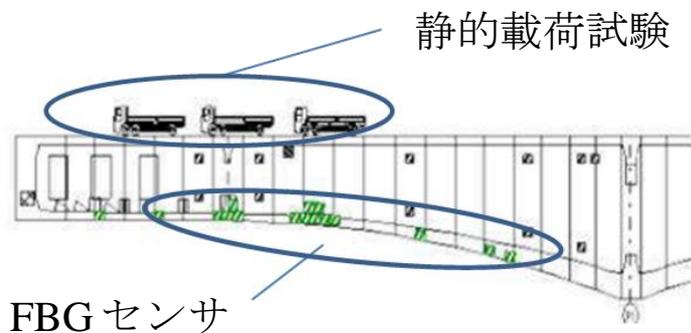
	1960	1970	1980	1990	2000
通信技術	光ファイバ提案	レーザ連続発振の成功 光ファイバ製造技術の確立 光コネクタの登場	光ファイバの大量生産を確立 SMF を使用した光通信の商用運用開始		
センサ		OTDR 光干渉型 光ファイバ ジャイロ	ROTDR BOTDR FBG	光偏光	BOF
用途		OTDR 保守監視	ROTDR 温度監視等	ひずみ、 振動、温 度等	ひずみ、 振動、温 度等
		光干渉型 ひずみ、振動、 温度等	ROTDR ひずみ分布等		
		光ファイバジャイロ 姿勢制御等	FBG ひずみ、振動、 温度等		

1.3.3 光ファイバセンサを用いたモニタリングシステムの実例

光ファイバセンサを用いたモニタリングシステムは、日本だけでなく世界各国で実証実験が行われている。日本国内では新潟県妙高市の妙高大橋、宮城県気仙沼市の気仙沼大島大橋においてFBG ロングセンサによるモニタリングを実施している⁽⁴¹⁻⁴²⁾。妙高大橋は昭和47年に完成したPC（Prestressed Concrete）箱桁橋であり、平成18年に橋梁定期点検により劣化、損傷が確認され、平成21年より補修工事を実施している⁽⁴³⁾。PC橋は通常の鉄筋コンクリートに比べて強い荷重に抵抗できることから、6万橋を超えるPC橋が建設されている⁽⁴⁴⁾。平成21年の補修工事の際に損傷のあるコンクリートを剥がしたところ、PCケーブルの破断していることが確認された。その後の経過観察でもPCケーブルの腐食の進行や新たな破断が確認されたことから、片側交通規制、緊急応急処置や橋梁のモニタリングが実施された。妙高大橋の構造健全性を評価するため、2点間の変化を動的測定が行えるFBG ロングセンサを分布的に設置し、静的載荷試験、動的走行試験における構造物の挙動を測定している。PCケーブル破断箇所及びFBGセンサ取付位置を図1.12に示す。損傷がある箇所にFBGセンサを12本配置し、20t車6台を用いた静的載荷試験と20t車1台を用いた走行試験による構造物の挙動測定を行った結果、構造全体及び局所的における挙動の高精度なひずみ分布計測が可能であること、構造物全体の変形、挙動を把握することが可能であると判明している。



(A) PC ケーブル破断箇所



(B) FBG センサ設置箇所

図 1.12 妙高大橋における構造モニタリング⁽⁴¹⁾

気仙沼大島大橋は鋼中露式アーチ橋であり，平成 31 年に完成し，予防保全管理の情報取得，異常時の橋梁健全性の把握，経年劣化の把握を目的として FBG ロングセンサによるモニタリングを実施している．また橋梁近くに FBG センサ用の測定器，計測データ転送用の装置を内包したシステムラックを設置し，インターネット回線での遠隔モニタリングシステムを構成している．開通前の静的載荷試験，走行試験による橋梁のひずみ測定が得ることができ，今後の橋梁の経年劣化状態の把握が期待されている．

その他にも光ファイバセンサを用いて河川氾濫予測の広域モニタリング実例がある⁽⁴⁵⁾．都市は構造物が密集しており，アスファルトに覆われていることから雨水が地面に浸透せず，中小河川や下水道に流れ込むため，内水氾濫が多発している⁽⁴⁶⁾．これらの早期検出を行うために光ファイバによる広範囲モニタリングが神田川流域の桃園川幹線や江戸川区で行われている．桃園川幹線では 10 年以上光ファイバ式水位流速計システムが稼働しており，このケーブルの予備芯を用いてモニタリングシステムを構築，江戸川区では j:com 江戸川局の協力を得て通信用光ファイバをセンサネットワークに活用してモニタリングを行っている．これらのシステムは既存の通信用光ファイバ網を活用することにより低コストで短期間にセンサネットワークの構築できることを実証している．光ファイバセンサネットワークを図 1.13 に示す．



図 1.13 江戸川区に構築した光ファイバセンサネットワーク⁽⁴⁴⁾

海外では英国の OptaSense 社が光ファイバ分散型音響センシング (DAS: Distributed Acoustic Sensing) による商用幹線網の監視を手掛けている．DAS はコヒーレント光時間領域反射測定法 (C-OTDR: Coherent-OTDR) を用いた音響測定

システムであり、1.3.2 項で説明した OTDR と同様にパルス光によるレイリー散乱光の測定を行っている。光ファイバ分散型音響センシングを図 1.14 に示す。C-OTDR はコヒーレント光を用いており、量子雑音限界に近い受信感度を有していることから微小な音圧の測定に有利である。C-OTDR と DAS によって検出される音響信号は脅威となる信号の判別が可能であることから、ガス、石油パイプライン、幹線道路、鉄道などで光ファイバを用いた監視システムを実用化しており、各国のプロジェクトに参加している⁽⁴⁷⁾。まず、パイプラインでは掘削時などの偶発的、窃盗による意図的な損傷や予防、パイプラインの疲労、腐食、地盤移動、設置時の不具合などの音響データを数万キロにわたってリアルタイムで監視しており、サウジアラビア王国の東海岸、西海岸に沿った 17 か所、約 5600 km 以上の水道パイプライン、世界で最も長いトルコ中部の石油パイプライン、中国南西部の天然ガスパイプラインで使用されている。次に幹線道路では走行車両の交通量や移動時間を計測することで交通渋滞を監視しており、英国の A27 ハイウェイにあるツインボアロードトンネルで検出装置のテストを行い、高速道路管理局が必要とする有用性、検出率、検出時間、誤作動の最低要件を満たしていることが確認されている。最後に鉄道では幹線路道路同様に列車の追跡によるスケジュールの管理、レールや車両の異常検知、落石と地滑りの監視、破壊行為や盗難を目的とした不法侵入などをモニタリングすることができ、アメリカの運輸省連邦鉄道局（Department of Transport Federal Railroad Authority）が推奨される安全対策を示している⁽⁴⁸⁾。

日本では機械システム振興協会が光ファイバを用いた新たなインフラ維持管理手法に関する戦略策定事業において DAS を用いたインフラ維持管理の試みを 2017 年から 2018 年に行った。2017 年度の事業では簡易実験として光ファイバを地中に設置し、DAS の有用性について評価を行い、地震計と同程度の精度を有していること、観測中の降雨による振動波形の変化を高い精度で観測が可能であることが確認され、インフラ維持管理に有望であることを示した。この結果より 2018 年度の事業では(株)阪神高速道路の協力を得て、既設の通信用光ファイバを用いて簡易的な橋梁の振動計測を行った結果、局所的に大振動する箇所、重量車の通行による極端な振動の検知可能を確認している⁽⁴⁹⁾。

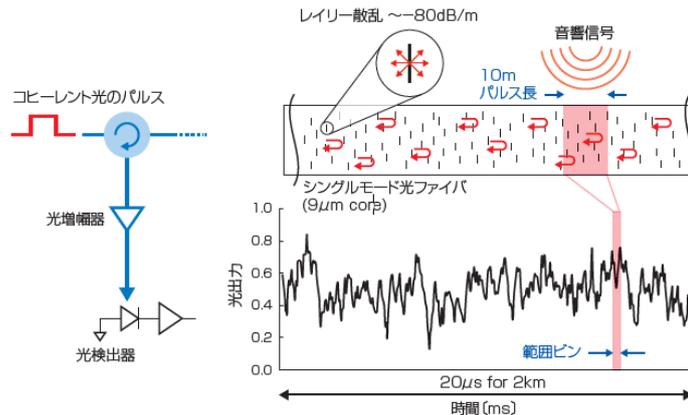


図 1.14 光ファイバ分散型音響センシング

1.4 本論文の目的及び構成

高度経済成長期にインフラ整備が整えられてから 50 年が経過し、各所で老朽化が目立ち始めている。少子高齢化による地方自治体のインフラに充てる予算や職員数は減少傾向にあり、建て替えや整備を行うにも時間がかかることから、半分以上のインフラ整備が耐久年度を過ぎても運用しており、それらの破損や崩壊を防ぐためには保守点検は必要不可欠である。笹子トンネル崩落事故を契機にインフラ設備の点検補修を本格的に行われており、地方自治体の土木部門の職員数や費用の減少に対して、計画的・効率的にインフラ整備を実施するための支援として、国土交通省は社会インフラの長寿命化計画を打ち出している。

その一環として低コストで広範囲の保守監視を行うことが可能な光ファイバセンサが提案されている。光ファイバが登場して以降、通信技術が発展するとともに光ファイバセンシング技術も新たなセンサが登場しており、様々な場所で研究、試験運用がされている。試験運用されている光ファイバセンサの設置方式はバス型が非常に多い。バス型は単線路上から各箇所に分岐あるいは線路上に光ファイバセンサを配置する方式で、複数の光ファイバセンサの使用ができることが利点であるが、単一線路であるため光ファイバが断線すると断線発生地点以降のセンサが使用できなくなる、伝搬損失により遠方になるほど検出が困難になるなどの問題が挙げられる。また、使用する測定器によって装置が高コストになる、一部の光ファイバセンサの長期信頼性の不安があることから、光ファイバセンサの普及を妨げている。

安価にかつ断線に対して対応力のあるヘルスマonitoringを構築するのに最適な光ファイバセンサの配置方式として、ツリー型配置方式が挙げられる。ツリー型配置方式は装置から出た光ファイバを枝状に分岐させて、設置する方式であり、こちらもバス型同様に各種光ファイバの使用が可能と断線以降の光ファイバセンサが機能しないことが挙げられるが、断線する箇所によっては、使用可

能な光ファイバセンサがバス型配置に比べて多く、1台の測定器でより広範囲に渡る測定が行える、面にセンサを配置できるので2次元的な解析状況の把握が可能である、1台でより多くの解析結果を得らえるなどの利点があることから、広範囲でのモニタリングシステムに最適であると考えられる。また、複数種のセンサを配置することで構造のモニタリングを詳細に行えることが可能である。バス型設置方式及びツリー型設置方式を図 1.15 に示す。

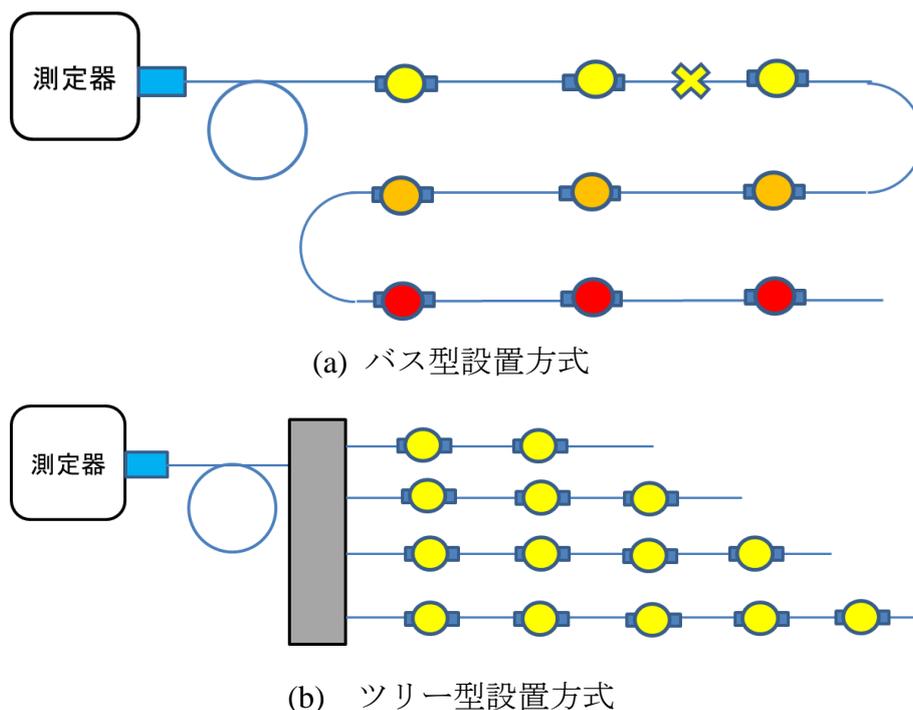


図 1.15 光ファイバセンサ配置例

よって本論文では社会インフラのヘルスマニタリングに適用可能な光ファイバセンシングについて論ずるとともに、ひずみ、微小振動を異なるセンサを用いて検出するために、ツリー型配置方式と複数種の光ファイバセンサを用いたモニタリングシステムの構築を目的とする。本論文の構成を図 1.16 に示す。本論文は5章から構成される。本章(第1章)では日本における社会インフラの保守監視状況について述べ、長期寿命化計画の技術背景として、光ファイバセンサ及びネットワークを活用したモニタリングシステムの実例について概説した。第2章では、誘電体多層膜を用いて、構造物が破壊する際に発生する弾性波(AE波)の検出について検討する。圧電型AEセンサとの相互校正法によるBOFセンサの周波数特性評価及び、建築物に多く使用されるコンクリート材料、新規部材として機械構造体に使用され始めた炭素繊維複合材を用いて破壊試験によるAE波検出を行う。第3章では標準シングルモードファイバ(SMF)を用いて長期信頼性を重視した簡易ひずみセンサの構造設計を目指す。創成と設計として使用

する光ファイバの曲げによる光損失の変化及び、偏波依存損失について明らかにするとともに、曲げの曲率変化による光ファイバ型ひずみセンサを作製し、荷重に対する光損失量の利得率や金属材料の引張りによるひずみ測定への応用を行う。また、作製したセンサ内部の光ファイバの変形を、有限要素解析を用いて解析し、実測値との比較を行う。第4章では分岐光線路による監視システムの構築として、分岐後のレイリー後方散乱光の計算手法、理論値と実測値の比較、発生している光損失の算出方法について明らかにする。また、第2, 3章で述べたセンサを用いた測定に手法の展望について述べる。第5章では以上の検討結果を要約する。

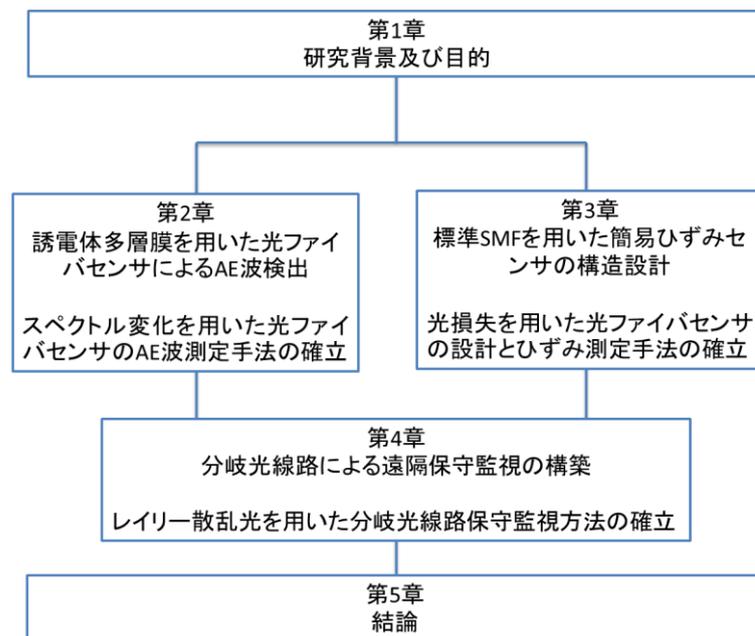


図 1.16 本論文の構成

第1章の参考文献

- (1) 根本祐二, “朽ちるインフラ問題の処方箋ーインフラマネジメント標準モデルの提案ー,” 精密工学会学術講演会講演論文集, pp91-92, (2015)
- (2) 宇都正哲, “インフラ老朽化の観点から東京に関して,” 都市在宅学, vol.2014, no.87, pp.14-17, 2014.
- (3) 国土交通省, “平成25年度国土交通白書,” 2007.
- (4) 梶田 佳寛, “建築分野におけるコンクリートの耐久性に関する基準の変遷,” コンクリート工学, vol.49,no.5,pp15-20,2011.
- (5) 国土交通省, “荒廃する日本としないための道路管理,” 2006.
- (6) 国土交通省, “米国ミネアポリス橋梁崩壊事故に関する技術調査報告,” 2007.
- (7) 井上泉, “笹子トンネル天井板落下事故と経営倫理,” 日本経営論理学会誌, vol.24, pp.165-177, 2017.
- (8) 国土交通省”トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書,” 2013.
- (9) 佐藤 善輝, 宮地 良典, 卜部 厚志, 小松原 純子, 納谷 友規, “鬼怒川中流域, 茨城県常総市上三坂地区における平成27年9月関東・東北豪雨の破堤堆積物,” 第四紀研究, vol. 56, no.2, pp. 37-50, 2017.
- (10) 吉松 弘行, 青木 隆典, 西川 純一, 藤沢 和範, “昭和63年7月島根県におけるがけ崩れ災害,” 地すべり, vol.26, no.2, pp. 24-30, 1989.
- (11) 土志田 正二, “平成26年8月20日広島豪雨における土砂災害現象について,” 安全工学, vol.57, no.1, pp.22-27, 2018.
- (12) 内閣府, “令和元年版防災白書,” 2019.
- (13) 風間 基樹, “2008年岩手・宮城内陸地震における斜面地盤災害,” 日本地震工学会誌, no.9, pp.25-30, 2009.
- (14) 増川 晋, 中里 裕臣, 荒砥沢, “小田ダムおよび荒砥沢ダム上流大規模地すべり調査報告,” 農業農村工学会誌, vol.76, no.8, pp705-707, 2008.
- (15) 鏡味洋史, “2003年宮城県北部の地震の被災域における過去の地震被害に関する文献調査のまとめ,” 日本建築学会技術報告集, vol.11, no.21, pp.4011-404, 2005.
- (16) 小谷俊介, “阪神大震災とその後の建築の動向と課題,” コンクリート工学, vol.43, no.9, pp.41-43, 2005.
- (17) 源栄正人, “東日本大震災における地震動と建物被害の実態と教訓,” 東日本大震災に関する技術講演会論文集, pp.15-38, 2012.
- (18) 杉野未奈, 山室涼平, 小林素直, 村瀬詩織, 大村早紀, 林康裕, “2016年熊本地震における益城町の建物被害の分析,” 日本地震工学会論文集, vol.16, no.10, pp.69-83, 2016.
- (19) 久田嘉章, 久保智弘, 松澤佳, 松本俊明, 田邊朗仁, 森川淳, “2011年福島県浜通り地震の地表地震断層の近傍における建物被害調査,” 日本地震工学会論文集, vol.12, no.4, pp.104-126, 2012.
- (20) 国土交通省, “これまでの公共投資の動向と今後のインフラ整備について,” 2020.

- (21) 総務省, “平成 31 年地方公共団体定員管理調査結果の概要,” 2019.
- (22) 総務省, “平成 31 年地方財政白書,” 2019.
- (23) 国土交通省, “第 22 回メンテナンス戦略小委員会 (第 3 期第 4 回),” 2018.
- (24) 国土交通省, “第 61 回基本政策部会,” 2018.
- (25) C. K. Kao and G.A. Hockham, “Dielectric-Fibre Surface Waveguides for Optical Frequencies,” *Proc. IEE*, vol.113, no.7, pp.1151-1158, 1966.
- (26) F.P. Kapron, D.B. Keck, and R.D. Maurer, “Radiation losses in glass optical waveguides,” *Appl. Phys. Lett.*, vol.17, no.10, pp.423-425, 1970.
- (27) J.B. MacChesney, P.B. O’Conner, E.V. DiMarcello, J.R. Simpson, and P.D. Lazay, “Preparation of low loss optical fibers using simultaneous vapor phase deposition and fusion,” *10th Int. Congr. on Glass*, vol.6,
- (28) M. Kawachi, S. Tomaru, M. Yasu, M. Horiguchi, S. Sakaguchi, and T. Kimura, “100 km single mode VAD fibres,” *Electron.Lett.*, vol.17, no.2, pp.57-58, 1981.
- (29) 島田 禎晉, “シングルモードファイバを使った日本縦貫光伝送システムの完成”, 映像情報メディア学会誌, Vol.59, no.12, pp1795-1799, 2005
- (30) K. Hagimoto: “Optical Core Network,” *NTT Technical Review 2005*, vol.3, no.6 pp.20-26, (2005).
- (31) K. kikuch: “Phase-Diversity Homodyne Detection of Multilevel Optical Modulation with Digital Carrier Phase Estimation,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 2006*, vol.12, no.4 pp.563-570, (2006).
- (32) 境目賢義, “マルチコアファイバ用光コネクタの構造創成と設計に関する研究,” 千葉工業大学博士学位論文, (2018).
- (33) G. Randemacher, R. Ryf, N. K. Fontaine, H. Chen, Rene-Jean Essiambre, B. J. Puttnam, R. S. Luis, Y. Sun, and R. Lingle, “Long-Haul Transmission Over Few-Mode Fibers With Space-Division Multiplexing,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 36, no.6, pp. 1382-1388, 2018.
- (34) E. Brinkmeyer, “Backscattering in Single-mode Fibers,” *Elect Lett.*, vol.16, no.9, pp.329-330, 1980.
- (35) 水野洋輔, 中村健太郎, “光ファイバ中のブリルアン散乱とそのセンサ応用,” *超音波テクノ*, vol5-6, pp.84-89, 2014.
- (36) 保立和夫, “センシング技術への光ファイバの応用,” *光学*, vol.12, no.5, pp.340-349, 1983.
- (37) K. O. Hill, Y. Fuji, D. C. Johnson and B. S. Kawasaki, “Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabricaton,” *Appl. Phys. Lett*, 32, p.647.1978
- (38) H. Takahashi, S. Suzuki, K. Kato, I. Nishi, “Arrayed-waveguide for wavelength division multi / demultiplexer with nanometer resolution,” *Institution of Engineering and Tecnology*, vol.26 no.2, pp87-88, 1990.
- (39) 植田憲一, “ファイバレーザーの基礎と将来,” *レーザー研究*, vol.29, no.2, pp79-83, 2001.
- (40) 津田浩, 佐藤英一, 中島富男, 佐藤明良, “光ファイバ広帯域振動検出システムの開発,” *Synthesiology*, vol.6, no1, pp45-54, 2013.
- (41) 石沢孝, “妙高大橋における構造モニタリングの結果と評価,” *月刊 OPTRONICS*, vol.33, no.391, pp.76-79, (2014)
- (42) 高岡満, “FBG ロングセンサによる構造物のモニタリング事例,” *光ファイ*

- バセンシング振興協会シンポジウム, 2019.
- (43) 小林憲一, 大平英生, 登石清隆, 羽田伸介, “妙高大橋の PC ケーブル破断調査と対策,” 橋梁と基礎, vol.45, no9, 2011.
 - (44) 国土技術製作総合研究所, “平成 24 年度道路構造物に関する基本データ集,” 国土技術製作総合研究所資料第 776 号, 2014.
 - (45) 君塚清, 村山英昌, “光ファイバセンサによる広域モニタリングシステムの開発,” 月刊 OPTRONICS, vol.33, no.391, pp.87-89, (2014)
 - (46) 尾崎 平, 浅野 統弘, 石垣 泰輔, 戸田 圭一, “短時間集中豪雨に伴う内水氾濫による地下街浸水特性の考察,” 土木学会論文集 B1 (水工学) ,vol.70, no.4, pp.I_1417-I_1422, 2014.
 - (47) Optasensa HP, <https://optasense.com/>
 - (48) デイビッド・ヒル, “光ファイバによる商用幹線網の監視,” Laser Focus World Japan, pp22-25, 2015-11.
 - (49) 機械システム振興協会, “平成 30 年度イノベーション戦略策定事業の成果—光ファイバーを用いた新たなインフラ維持管理手法に関する戦略策定—,” 2019.

第2章 誘電体多層膜を用いた光ファイバセンサによる構造体の AE 波検出の検討

2.1 はじめに

社会インフラの検査には主に目視による点検とハンマーによる打音検査が用いられるが、どちらの方法も作業員の技量により評価が左右され、定量的な評価が難しく、トンネル、高速道路では通行止め、あるいは車両規制を行い、長時間かけて点検を行う必要がある。これらの問題を解決するために、センサを取り付け、インフラの状態を常時・継続的に把握するセンサシステム、画像からひび割れ等を判別するデータ処理手法によるモニタリングシステム、立ち入りが困難な箇所の状態を把握するために小型非破壊検査装置付きロボットの開発などがされている。

本研究では光ファイバを用いて社会インフラのヘルスマニタリングシステムを構築することを目的としているため、非破壊検査であるアコースティックエミッション (Acoustic Emission : AE) 検出について検討する。AE は材料が変形、き裂などが発生すると、材料内部に蓄積された歪みエネルギーが解放され、弾性波として放出され材料内を伝搬する現象である⁽¹⁾。AE 測定は超音波領域の信号を対象にしていることから超音波探傷方法と類似しているが材料自身が放出する信号を受動的に感知することから、ほかの非破壊試験とは異なる。また、材料の変形や破壊の進行を広範囲でリアルタイムでのモニタリング、複数のセンサを用いることで変形、き裂等の位置特定、測定対象が稼働中でも観測が可能である。一般的な AE センサはピエゾを用いたセンサが主流であり、振動を微弱電流に変換して測定を行うが使用環境によって対策を施す必要がある。また、遠隔モニタリングを行う場合、電磁ノイズの影響にも注意しなければならない。光ファイバセンサは経路及びセンサ部は電源を用いていないことから防爆対策や電磁ノイズ対策を行う必要がなくこれらの問題点を解決することができる。

振動を検知可能な光ファイバセンサとして光ファイバ分布型音響センサ (Distributed Acoustic Sensor : DAS) , 光ファイバドップラセンサ (Fiber Optical Doppler : FOD) などが挙げられる。DAS, FOD センサは優れた性能を有しているが、それぞれ問題点も存在する。DAS は光ファイバ内で生じるレイリー散乱光を対象に測定を行うが、レイリー散乱光は非常に光強度が小さいため、ノイズに埋もれやすく、振動発生地点の特定が難しい問題がある。一方 FOD センサは光ファイバの伸縮により発生するドップラ効果を用いた振動測定手法であり、AE 検出において優れた性能を有しているが、多数配置する場合測定装置側が大型化する問題がある。

そこで(株)渡辺製作所の BOF センサに着目した。BOF センサは温度用光ファ

イバセンサとして開発されたものであり、ファイバ端面に誘電体多層膜を形成している。この誘電体多層膜の膜厚、屈折率が変化することにより、BOF センサの反射スペクトルが変動し、スペクトルシフト量から温度を測定することができる⁽²⁻³⁾。また、BOF センサに圧力を軸方向に加えることで反射スペクトルがシフトすることをこれまでの研究で確認している。振動を周期的に変動する荷重として捉えた場合、反射スペクトルは波長軸上を移動し、反射光強度の変化を測定することで振動を検知することができると考えられる。

よって本章では BOF センサを用いて AE 検出について検討を行う。AE は材料によって異なるが、数 kHz から 1 MHz までのパルス信号を発することが報告されている。接触法を用いて BOF センサの周波数特性について調査を行う。また、コンクリート試験片、炭素繊維複合材 (CFRP) 試験片の破壊試験による AE 検出を行い、BOF センサの AE 測定の有用性について評価を行う。

2.2 BOF センサのアセンブリ及び特性について

2.2.1 BOF センサについて

BOF センサは(株)渡辺製作所の斧田氏らが提案した温度用光ファイバセンサである。光ファイバを装着したジルコニアフェルール、割りスリーブ、(株)日本電気硝子社製の FIX スタブ⁽⁴⁾を用いて構成しており、FIX スタブ端面に誘電体多層膜を形成している。BOF センサのアセンブリ工程を図 2.1 に示す。

誘電体多層膜は高屈折率 (二酸化チタン : TiO_2 , 五酸化タンタル : Ta_2O_5) と低屈折率 (二酸化珪素 : SiO_2) の繰り返しで形成されているものが多く、BOF センサの BPF は SiO_2 と Ta_2O_5 を用いて、スパッタリング蒸着方式で形成している。スパッタリング蒸着は高融点材料の薄膜形成が比較的低温で実現できること、基板に飛来する粒子の運動エネルギーが大きいため薄膜の付着力が良好であること、大面積基盤に対して高速推積が可能であることなどの特徴を有している⁽⁵⁾。

FIX スタブは結晶化ガラスプリフォームに光ファイバを挿入しながら線引き成型している。結晶化ガラスはガラス材料を熔融、常温まで冷却した後 750~800 °C の各形成温度で熱処理を行うことにより、ガラス内部に微細な結晶を析出させている。結晶化ガラスは表面に微細な傷が生じてもクラックの進展が結晶粒界で止まるため強度低下の心配がなく、アルミナと同程度の強度を有しているためジルコニアフェルールと同様に取り扱うことができる利点がある⁽⁶⁾。また、結晶化ガラスの材質は光ファイバに近く、光ファイバと結晶化ガラス母材を共に線引きして作成していることから、成膜後の残留応力も小さく、膜剥離が生じる可能性は低いと考えられる。

BOF センサのアセンブリ工程においてジルコニアフェルールと FIX スタブ間に空隙が存在すると多重反射が生じ、反射スペクトルに影響を与える可能性があるため、両者に APC 研磨及び屈折率整合剤を用いている。APC 研磨は反射減衰量 60 dB 以上を実現する方法として考案されたものである。接続面を 8°程度傾けることで接続面の反射光を放射モードとしてクラッドに逃がす手法であり、光ファイバ接続では多く用いられている。屈折率整合剤は光ファイバと同じ屈折率を持つ粘性剤であり、MT コネクタなど平面研磨時に生じた光ファイバ部の凹みによって発生する空隙に使用されている。BOF センサは割りスリーブと接着剤の固定方式であるため、接続面に空隙が発生しやすいことから、屈折率整合材を用いてスタブ、フェルール間の多重反射を抑制している。

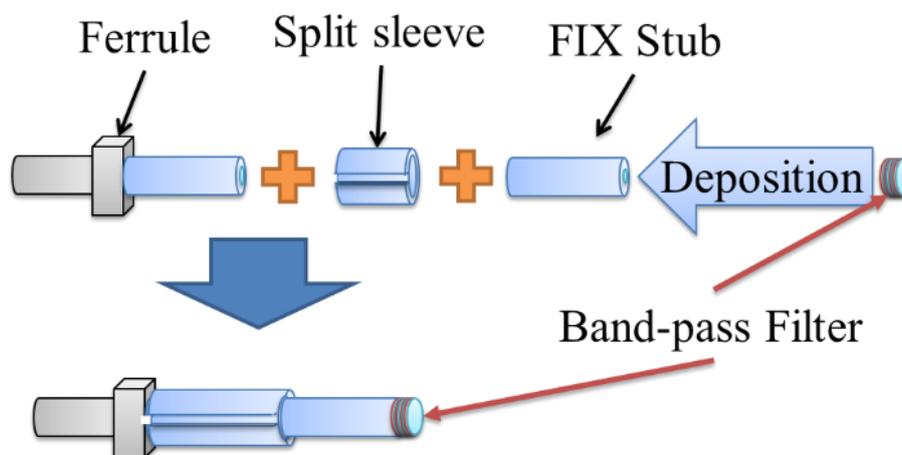


図 2.1 BOF センサアセンブリ工程

2.2.2 BOF センサの反射スペクトルについて

BPF の各膜厚は光干渉の基礎に沿って設計されている。例としてとある厚さの媒質が複数存在するときその媒質内では透過・反射が生じ、透過した光は再び透過・反射をする。その際反射光の位相差が 1 ずれていれば各媒質の反射光は互いを強め合い、反射光の位相差が 0.5 ずれていれば各媒質の透過光は強め合うことになる。光ファイバ内の光は垂直光として扱うことができるので光路差が $2nd$ となり、反射光を強める場合は(2-1)式を、透過光を強め合う場合は(2-2)式が成り立ち、BOF センサの各膜厚の厚さは(2-3)式より決定されている⁽⁷⁾。しかし、これは理想状態の膜厚であり、実際に生成される膜厚は多少の誤差が生じ、BOF センサの透過中心波長は理想値から外れてしまい、その都度光源の波長を調整するのは非効率である。そのため、理想中心波長より約 5 nm 程度短波長側にずらして生成し、高温炉を用いて誘電体多層膜を酸化させる⁽⁸⁻⁹⁾ことで BOF センサの中心波長を理想の中心波長へ調整を行っている。

$$2nd = \lambda \dots\dots\dots (2-1)$$

$$2nd = \frac{1}{2}\lambda \dots\dots\dots (2-2)$$

$$d = \frac{1}{4n}\lambda \dots\dots\dots (2-3)$$

薄膜内の多重反射を図 2.2 に、BOF センサの反射スペクトルを図 2.3 に示す。3つの領域の屈折率を n_1, n_2, n_3 、入射角度を θ_1 、膜中の屈折角を θ_2 とあらわすと、 θ_2 はスネルの法則、 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ より計算することができる。反射した光の電場 E は、多重反射を考慮して(2-4)式のように無限級数で書き表すことができる⁽¹⁰⁾。ここで E_0 は入射光の電場を表す(振幅反射率: r 、振幅透過率: t)。

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n \dots\dots\dots (2-4)$$

$$E = E_0 \left(r_{12} + t_{12} t_{21} r_{23} e^{i\Delta} \frac{1}{1 - r_{23} r_{21} e^{i\Delta}} \right) \dots (2-5)$$

ここで Δ は、薄膜を V 字型に往復したときの位相差で、光の波長 λ を用いて(2-6)式で与えられ、振幅反射率の計算を進めると (2-7) 式のように簡略化することができる。

$$\Delta = \frac{4\pi n_2 l \cos \theta_2}{\lambda} \dots\dots\dots (2-6)$$

$$r = \frac{E}{E_0} = \frac{r_s + r_{12} e^{i\Delta}}{1 + r_s r_{12} e^{i\Delta}} \dots\dots\dots (2-7)$$

BOF センサに熱を印加すると、BPF の膜厚や屈折率は温度に応じて変化し、BOF の反射スペクトルが長波長側にシフトする。1℃あたりの反射スペクトルシフト量は約 13 pm であり、平均的な FBG の温度感度に比べて大きいことが報告されている⁽¹¹⁾。

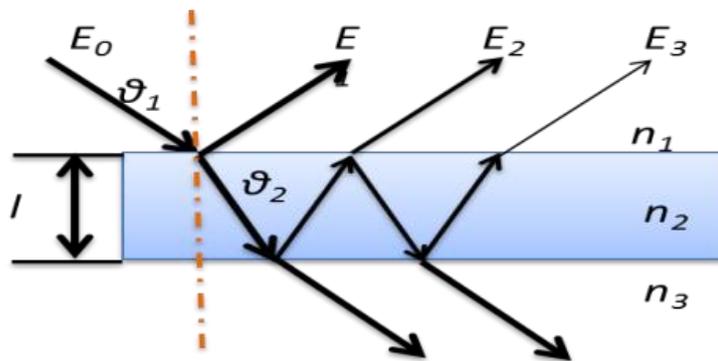


図 2.2 薄膜内の多重反射

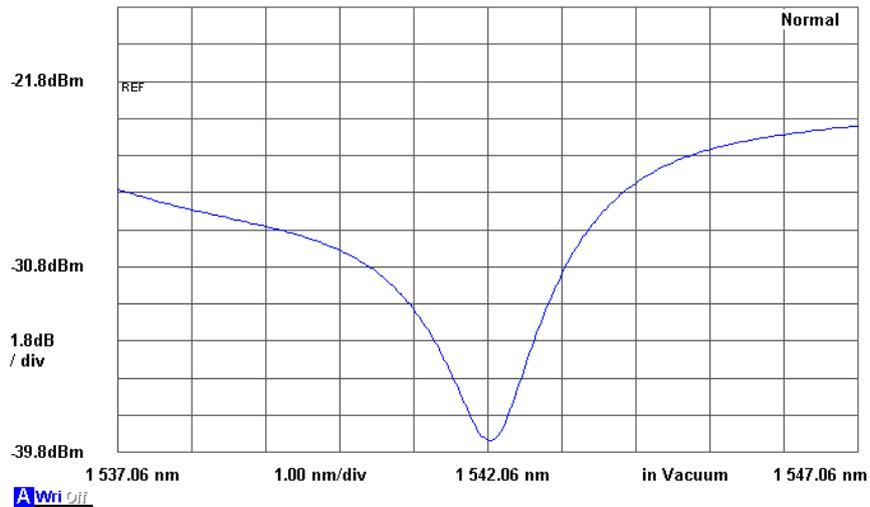


図 2.3 BOF センサの反射スペクトル

2.3 荷重変化に対する反射スペクトルシフトについて

BOF センサの反射スペクトルは 2.2.2 項で述べたように薄膜の膜厚と屈折率によって決まり、これらが変わると反射スペクトルがシフトする。温度変化では屈折率の変化が支配的であり、長波長側にスペクトルにシフトしているが、膜厚方向に荷重が印加されると、弾性変形により光路長が変化し、反射スペクトルは温度とは逆の反応を示すことが予想される。そこで荷重変化による反射スペクトルシフト測定を行う。測定方法として BOF センサに荷重を 1 N まで加えた時の反射スペクトルシフトを ASE 光源とスペクトルアナライザを用いて測定した。測定方法を図 2.4 に、荷重負荷による反射スペクトルシフトを図 2.5 に示す。

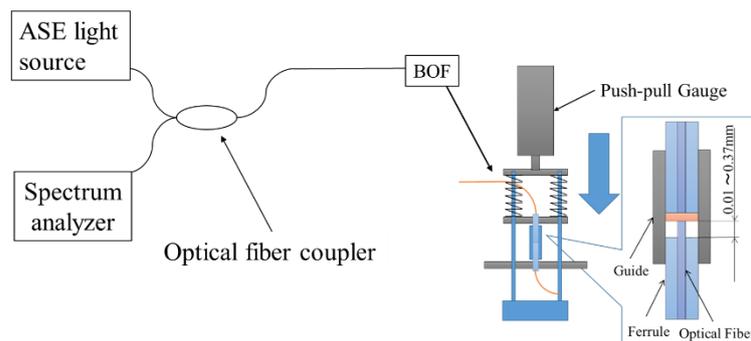


図 2.4 荷重変化による反射スペクトルシフト測定

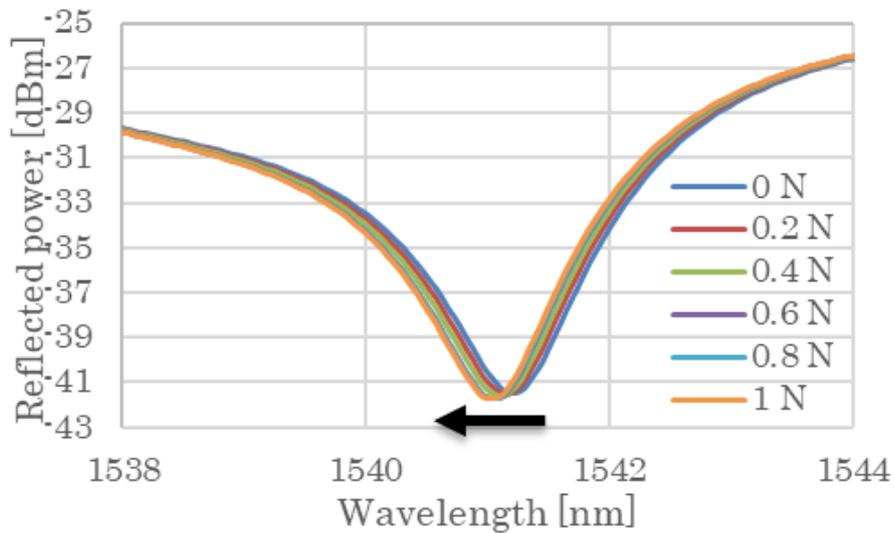


図 2.5 荷重による反射スペクトルシフト

図 2.5 より BOF センサの反射スペクトルは短波長側にシフトしたが，温度変化に比べ，反射スペクトルシフト量は小さい．温度による反射スペクトル変化より小さい要因として次の 2 つが挙げられる．

1. ヘルツの弾性接触
2. 研磨後の IX スタブの頂点位置

まずヘルツの弾性接触について述べる．BPF を蒸着した FIX スタブは研磨盤を用いて端面を仕上げている．研磨工程はダイヤモンド砥粒を使用し，高い加工圧で端面の形成を行うため，光ファイバ端面に加工変質層が生成される．加工変質層は SiO_2 超微粒子を用いた仕上げ加工により形成を抑えている⁽¹²⁾，研磨盤の仕様上，端面は凸球面で仕上がる．そのため荷重が加わるごとに FIX スタブ端面の接触範囲が拡大したことで薄膜の変化量が小さくなると予想される．研磨工程を図 2.6 に，ファイバ端面の接触を図 2.7 に示す．

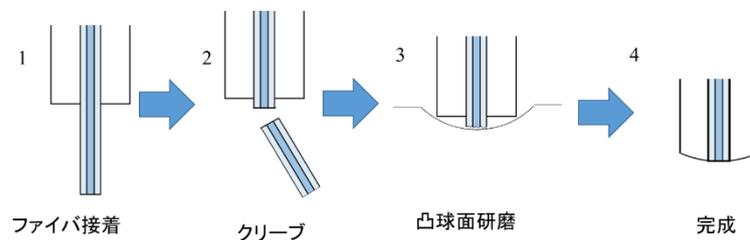


図 2.6 光ファイバの切断工程及び研磨工程

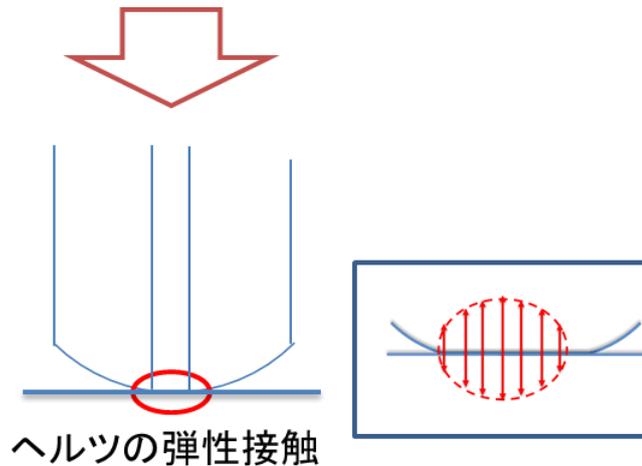


図 2.7 ヘルツの弾性接触

次の要因として、凸球面研磨後の頂点は必ずしもフェルール中心軸上には無く、ある程度ずれて生成される。頂点ずれは研磨工程で研磨盤への荷重が一定でない状態やフェルールの固定が不十分である状態で研磨を施すときに生じる。この頂点ずれ量は研磨盤の性能によって異なるが、最大約 $50 \mu\text{m}$ 程度で収まるように設計されている。しかし、凸球面形状で研磨されている関係上、頂点から中心に接触するまでに必要な押圧力は変化することが考えられる。そこで光ファイバ端面の微小変形解析を行った。

押圧力とファイバ端面弾性変形の関係性についてはマルチコアファイバ (Multi-Core Fiber : MCF) を用いた検証が行われている⁽¹³⁾。MCF は 1 本の光ファイバにシングルモード条件のコアを複数有しており、それぞれに光を入射することができる。研磨を行った MCF は図 2.8 に示すように頂点のコアと周辺のコアに高さの差が生じるため、周辺のコアが PC 接続するためには高さの差分の押圧力が必要となる。この差によって生じる押圧力の違いを利用することでファイバ端面の弾性変形を反射減衰量することにより必要な押圧力を求めることができる。また、有限要素法(FEM)による解析も併せて行い実測と解析の両面から検証を行い、PC 接続時の押圧力と中心以外のフェルール端面弾性変形の詳細を明らかにするとともに、MCF コネクタ端面形状の許容範囲に関する指針を得ていることが報告されている⁽¹³⁾。

よってこの解析手法を用いて頂点ずれを有している光ファイバ端面の有限要素解析を行った。有限要素解析に使用する 3D モデルは Autodesk Inventor によって作成し、有限要素解析ソフトの ANSYS に取り込んだ。3D モデルは結晶化ガラスフェルール、SMF を固着させ、ファイバ端面に剛体を接触させた。3D モデルに使用した材料特性(物性値)を表 2.1 に⁽¹⁴⁻¹⁵⁾、3D モデルの構成と外観を図 2.9

に示す。このとき、剛体の壁は変形せず、移動も起こさないような拘束条件を設定し、フェルールには円筒支持を定義し、フェールの後端面から荷重 5 N を軸方向に与える条件で解析を行った。また、メッシュサイズについては SMF と結晶化ガラスフェールの固着領域、SMF 端面と剛体の接触箇所を 5 μm に設定している。頂点ずれ量 50 μm の解析結果を図 2.10 に示す。

解析結果より荷重が増加するごとに変形量も増加し、その後一定になっている。これはコアが剛体の壁に接触し変形が止まったためである。つまりコアが対象に接触し PC 接続していると考えられる。また中心に接触するまでに必要な押圧力は頂点ずれ 50 μm で 2 N 必要であることを確認した。以上のことからヘルツの弾性接触により中心の応力が変化すること、頂点ずれ量により必要な押圧力が変わることから、荷重変化に対する反射スペクトルシフト量が小さく、絶対値が必要である荷重測定には向いていないことが判明した。

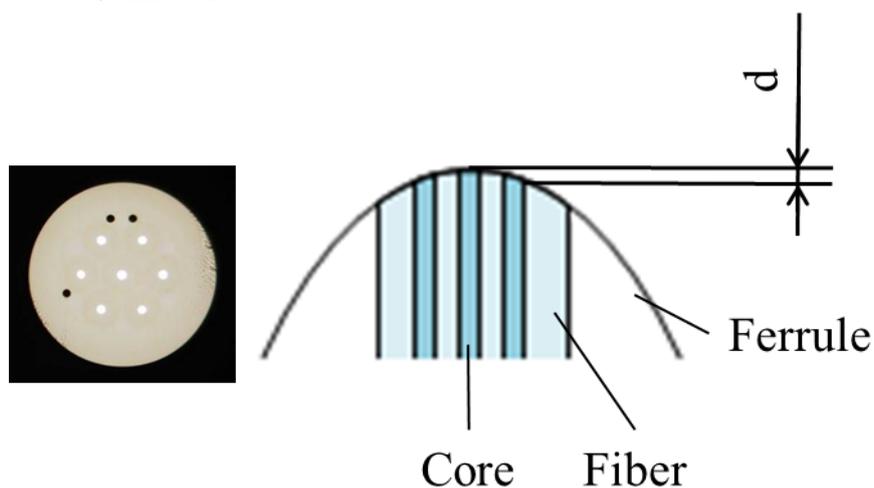


図 2.8 MCF の凸球面研磨一例

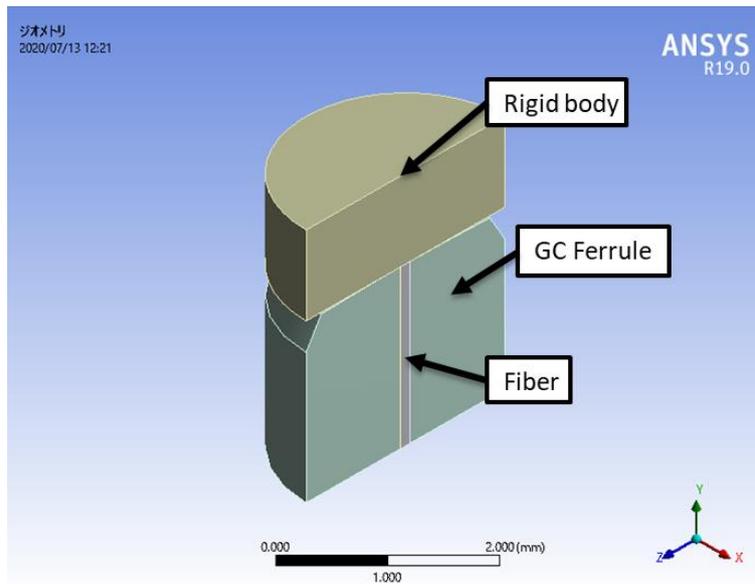


図 2.9 MCF の凸球面研磨一例

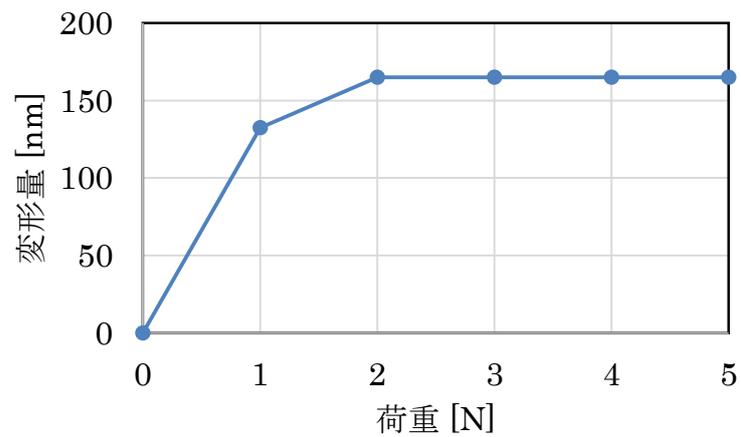


図 2.10 頂点ずれ量 50 μm の解析結果

表 2.1 材料物性値⁽¹⁴⁻¹⁵⁾

	Material	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
SMF	Silica glass	71.5	0.14
フェルルール	Glass-Ceramic	83	0.22

2.4 BOF センサの周波数特性

2.3 項より絶対値を求めることを必要とする荷重測定は難しいが、振動測定は可能であると考えられる。振動測定では荷重での反射スペクトルが短波長側にシフトする特性を利用することで測定することができる。振動は周期性を持った荷重としてとらえることができ、反射光強度も同様に周期的に変化するため、振動検出が可能となる。このとき、振動による反射スペクトルの変化を測定する場合、サンプリング周波数と測定精度は反比例関係にあるため、測定が困難になる問題がある。そこでサンプリング周波数、測定精度を維持したまま測定を行うために、反射スペクトルの片側変曲点に光源波長の設定をすることで、反射光強度の変化量から発生源の振動を測定することができる。振動測定原理を図 2.11 に示す。

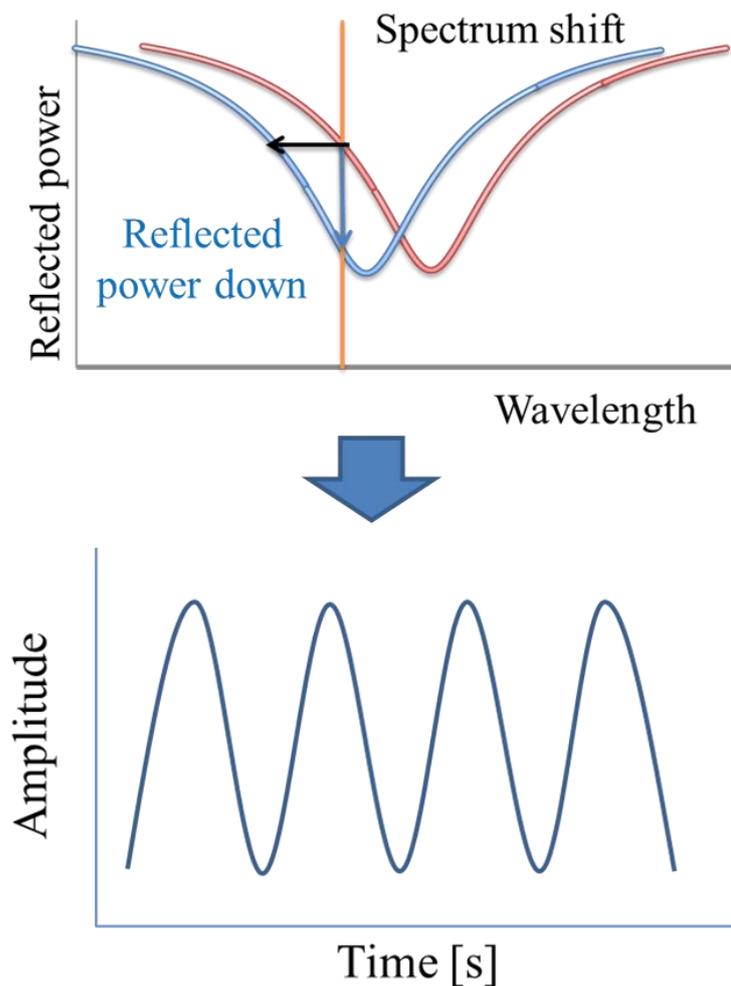


図 2.11 振動測定原理

構造体が発する AE 波は使用している材料によって異なるが数 10 kHz 以上であることが報告されている⁽¹⁶⁾。BOF センサは 1000 Hz 以下の測定は可能であるがそれ以上の周波数は不明である。そこで接触法による BOF センサの周波数特性を調査する。接触法は比較的広帯域な特性を持つ基準器に校正すべきセンサを密着させ、基準器に加えた電圧とセンサの出力電圧の比を取る方式である。基準器の特性が含まれることや、物理量との対応ができないデメリットがあるが、2 つ以上のセンサを比較するには最も簡単な方法である⁽¹⁶⁾。ピエゾ式 AE センサにアンプ、ファンクションジェネレータを接続し、周波数をコントロールする。BOF センサは OCWR(Optical Continuous Wave Reflectometer)法を用いて反射光強度の測定を行う。OCWR は光源から連続光を入射し、入射光と反射光のパワー比から反射率を測定する方式である。連続光を用いるため本実験のように振動のような連続的に変化する物理量を測定することが可能である。また、測定器のデータ処理に影響されることはなく、参照光を用いないため、絶対的な測定値が得られる⁽¹⁷⁾。接触法による測定方法を図 2.12 に、測定結果を図 2.13 に示す。このとき、BOF センサとピエゾ式 AE センサに接触させ、10kHz から 1 MHz に設定した 1 V の電圧をピエゾ式 AE センサに出力した。また、BOF センサの後方から 2 N の荷重を印加させ、ピエゾ式 AE センサとの間隙を抑制している。

図 2.13 に示すように 1000 kHz まで測定が可能であり、一定量の反射光強度を得ることができているが、共振型 AE センサに比べて S/N 比が良くないものの、フラットな周波数特性を有していることを確認した。実際の測定では発生する AE は微弱であるため、増幅器を用いて測定を行う。このことから BOF センサを用いた測定でも同様に増幅器を用いて対処することになると考えられる。また、本研究で測定を行うコンクリートや炭素繊維複合材から放出される AE 波は数十 kHz~1 MHz であることが報告されており⁽³⁴⁾、広帯域の周波数を測定ができることから BOF を用いた AE 測定は十分可能であることが判明した。

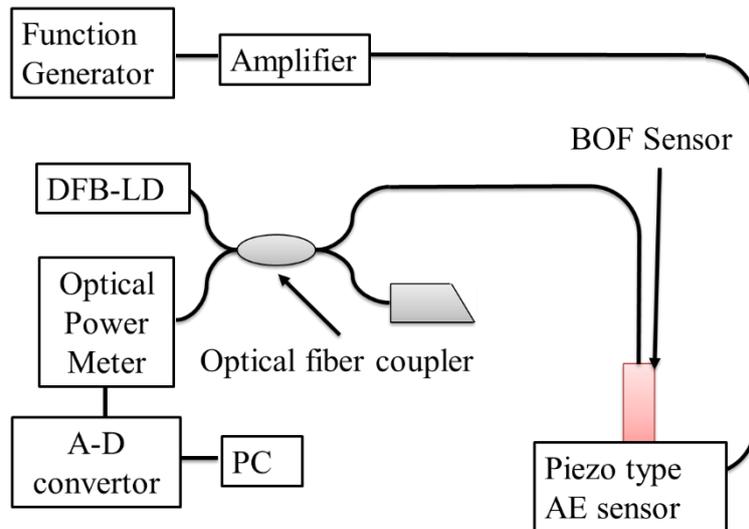


図 2.12 接触法による測定

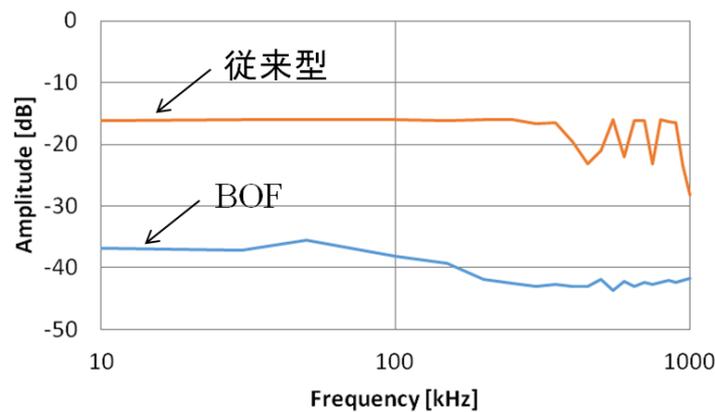


図 2.13 測定結果

2.5 破壊試験における炭素繊維複合材の AE 波測定

2.5.1 炭素繊維複合材試験片について

炭素繊維強化複合材は PAN（ポリアクリロニトリル）あるいは、石油・石炭から得られるピッチ系を繊維状に加工し、繊維の方向を一方向あるいはクロスにして樹脂等を組み合わせることでプリプレグシートを作製する。これらを積層させることにより、様々な特性を持つ炭素繊維強化複合材を作成することができる。炭素繊維複合材の作製過程を図 2.14 に示す。炭素繊維強化複合材の特徴として、金属に比べて軽量、高強度、高剛性に優れており、振動減衰、電磁波遮断性、X 線透過率が良いなどがある。このことから、自動車、航空宇宙、環境エネルギー、軍事用途などに使用されている。1960 年に研究が開始されて以降、航空機や自動車、環境エネルギー等に使用されており、炭素繊維複合材を用いた構

造物が増えると考えられる⁽¹⁸⁾。また、建築・土木関係でも CFRP は注目されており、橋梁などへの新素材の適用による耐久性向上に向けた取り組み⁽¹⁹⁾や構造体の補修・補強⁽²⁰⁾、など研究や実用化がされている。それにより炭素繊維複合材の需要は増大する傾向にあり、今後、年間 150 千トンを超えると見込まれている⁽²¹⁾。炭素繊維複合材の年間需要を図 2.15 に示す。

金属材料より優れている炭素繊維複合材だが、金属と違い柔軟性がないため、衝撃もしくは大きな負荷が加わると樹脂割れ、繊維破断、自由端面での層間剥離などが発生し、圧縮強度が失われ壊れやすくなる。他の材料と異なり高強度であることから比較的高い周波数の AE 波を放出するが、樹脂を使用していることから信号伝搬減衰が非常に高い特性を有している。CFRP の破壊モードは開口型（モードI）、面内せん断型（モードII）、面外せん断型（モードIII）の 3 種類に分類され、静的な面外負荷では面内せん断型の剥離が、面外衝撃負荷ではその際発生する AE 波は破壊モードによって異なり 50~630 kHz 程度である⁽²²⁻²⁴⁾。炭素繊維複合材の損傷を図 2.16 に、各破壊モードの周波数を表 2.2 に示す。本研究では炭素繊維複合材の寸法は 240×18×3 mm、各層が 1 mm、繊維の方向は中心が幅方向、外側が長さ方向の三層のものを使用した。

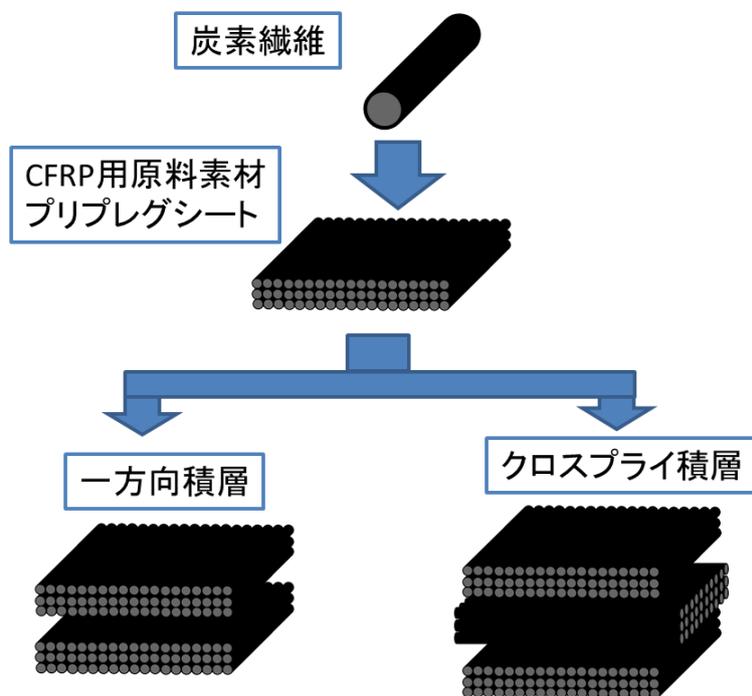


図 2.14 炭素繊維複合材作成過程

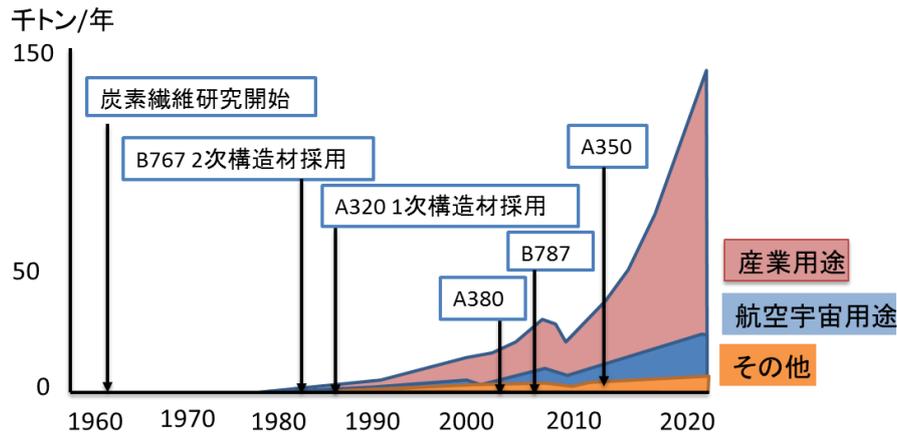


図 2.15 炭素繊維複合材の年間需要

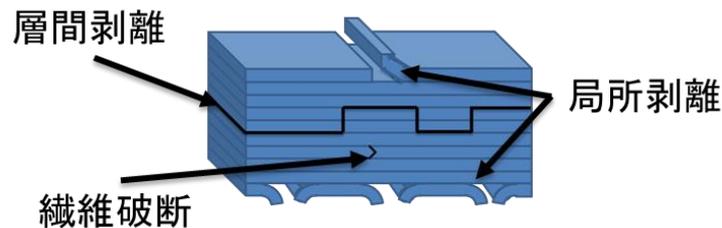


図 2.16 炭素繊維複合材の損傷

表 2.2 各破壊モードにおける AE 波の周波数

損傷種類	周波数(kHz)
樹脂割れ	50 – 100
層間剥離	150 – 250
繊維破断	270 – 390
繊維間摩擦	630

2.5.2 3点曲げ破壊における AE 波検出

2.4 項において炭素繊維複合材が発するであろう AE 波の最大周波数を測定することができるのを確認したので、炭素繊維複合材を破壊し AE 波を発生させ、BOF センサとピエゾ式 AE センサを用いて AE 波検出を試みた。破壊方法として 3 点曲げ試験による各試験片の破壊試験を行う。3 点曲げ試験による試験片の破壊方法として炭素繊維複合材では複数の破壊モードが生じるため、JIS K 7074⁽²⁵⁾に定められた測定手法とセンサと圧子の距離 d は 80 mm に設置し、炭素繊維複合材に一定時間荷重負荷を印加した状態を維持し、その都度発生する AE 波の測定の 2 種類の測定を行う。このとき、長時間の測定は取得データが

膨大になるため、図 2.17 に示すように振動により得られた信号波形が設定したしきい値 (③) より大きい場合、発生する前の数秒間 (②) から指定した数秒間 (①) 保存することができるソフトを作成した。炭素繊維複合材破壊試験及び測定方法を図 2.18 に、一定荷重負荷時の測定結果を図 2.19 に示す。

図 2.19 より一定負荷時の測定結果では炭素繊維複合材に大規模な破壊は見られないが、AE 波の検出を確認し、得られた AE 波の周波数は約 160~200 kHz を示していた。200 kHz は層間剥離が出力する AE 波であり炭素繊維複合材の外面に傷などが見られないことから層間内に発生した剥離だと考えられる。以上の測定結果から BOF センサで高周波領域の AE 波が測定可能であることを確認した。

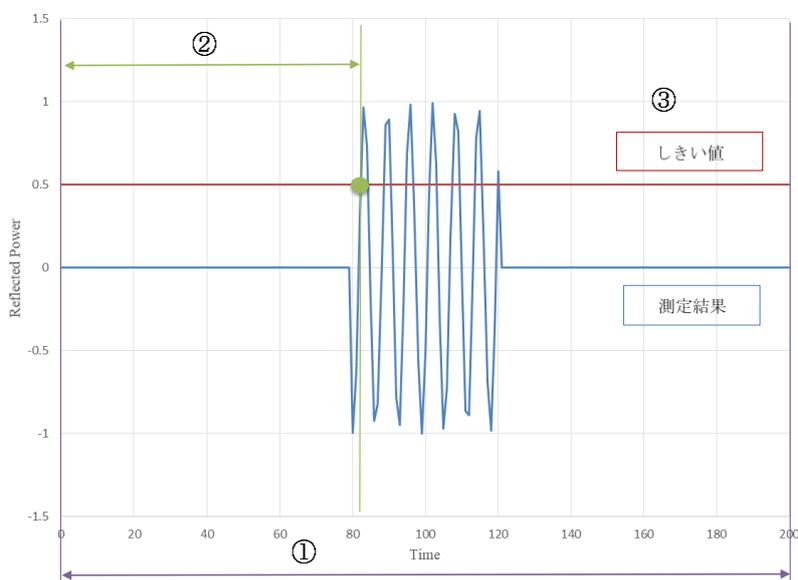


図 2.17 炭素繊維複合材破壊試験及び測定方法

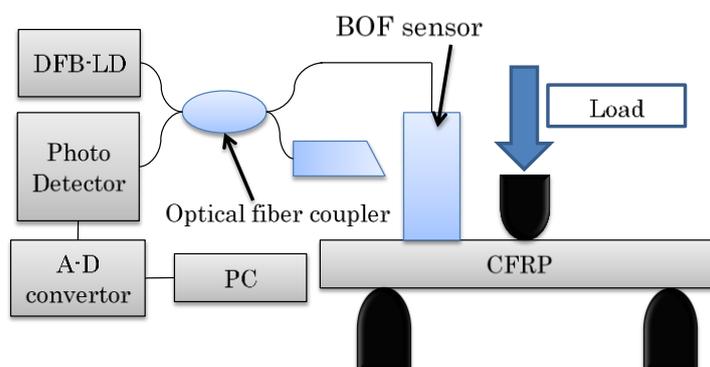
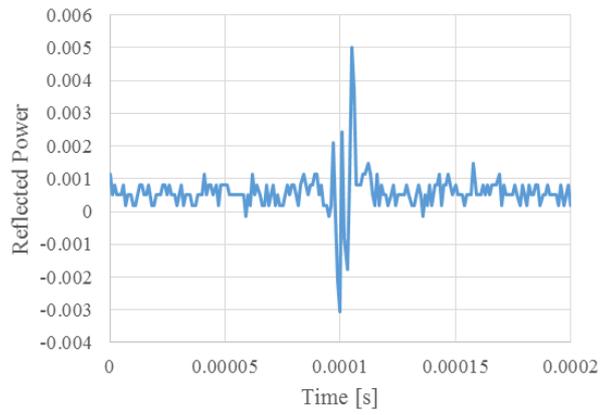
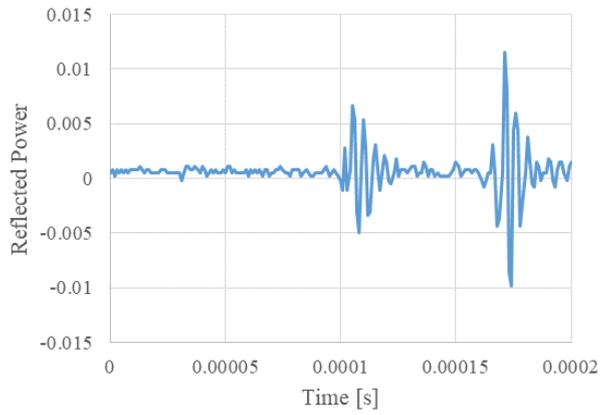


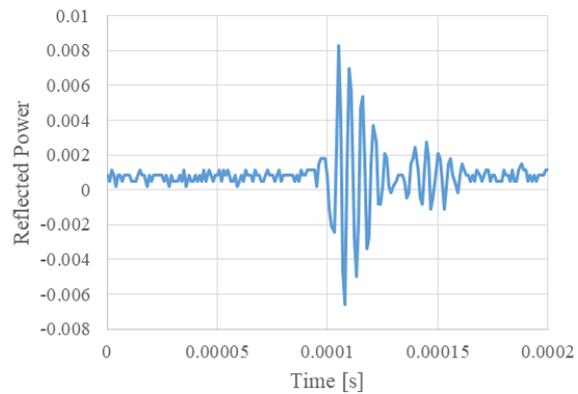
図 2.18 炭素繊維複合材破壊試験及び測定方法



(A) 負荷をかけてから 26 分後の AE 波



(B) 負荷をかけてから 35 分後の AE 波



(C) 負荷をかけてから 58 分後の AE 波

図 2.19 一定荷重負荷時の測定結果

2.5.3 層間剥離における AE 波検出

AE 波の周波数は破壊モードに起因するため、逆に AE 波の周波数からどのような破壊をしたか特定できる⁽²²⁾これまでの実験でモード II 型層間剥離及び層間剥離と思われる損傷の AE 波の測定が行えている。そのことから一定荷重負荷の測定結果が層間剥離による AE 波であるかを確認するため、単一の破壊モードを引き起こし、その破壊モードに対応した周波数を検知可能であることを調査する。測定方法として層間剥離を意図的に起こした炭素繊維複合材にアルミ板を挟み押し込むことで層間剥離を進展させる手法を用いて、AE 波を発生させる。炭素繊維複合材の寸法は 140×18×3 mm であり、50 mm ほど層間剥離を起こし、差込口から 100 mm に BOF センサを設置した。測定系(層間剥離)を図 2.20 に、測定結果を図 2.21 に示す。

測定結果よりアルミ板を押し込むごとに複数回 AE 波の検出を確認した。検出された AE 波の周波数は 150~250 kHz を示しており、一定荷重負荷で得られていた周波数とほぼ一致していることから一定荷重負荷時で発生していた AE 波は層間剥離によるものと断定することができる。

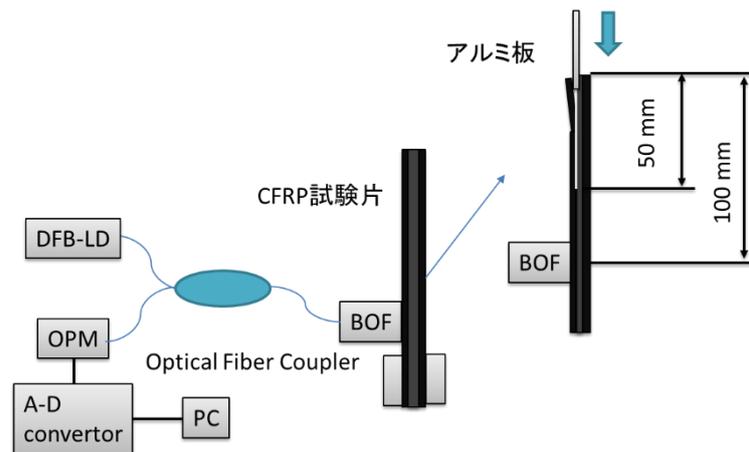
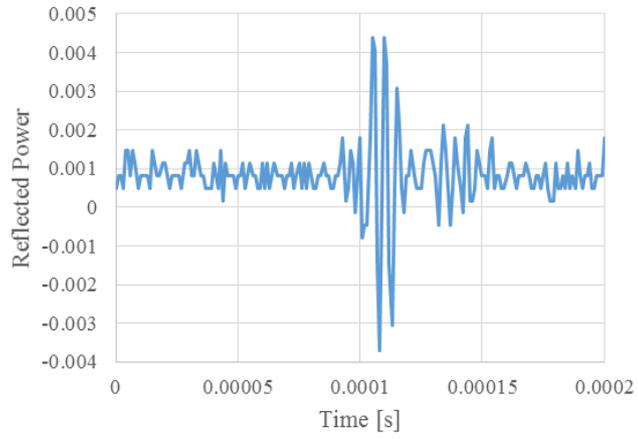
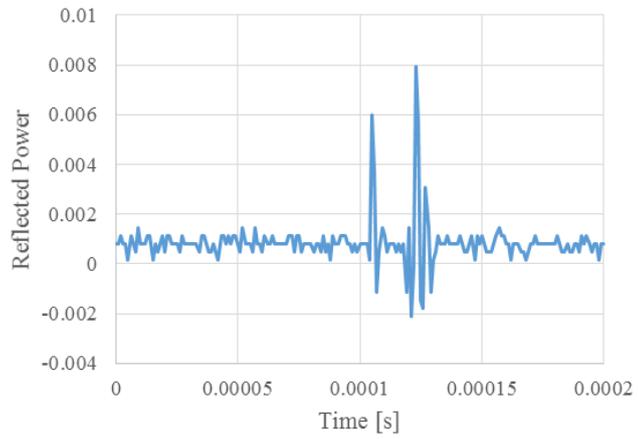


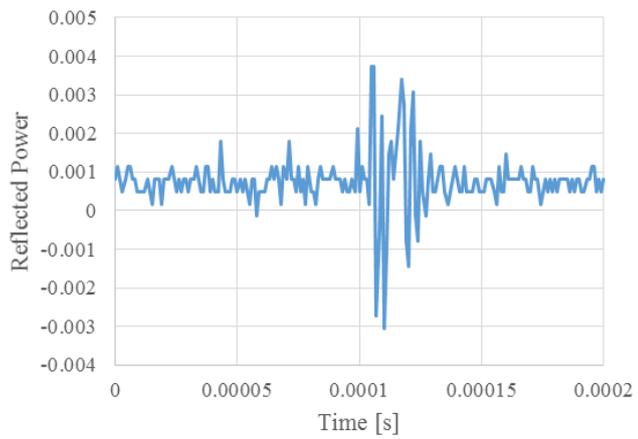
図 2.20 層間剥離による AE 波測定方法



(A) 押し込み 40 mm



(B) 押し込み 45 mm



(C) 押し込み 50 mm

図 2.21 測定結果

2.5.4 落錘衝撃負荷における炭素繊維複合材の AE 波検出

2.4.2 項及び 2.4.3 項では静的な面外負荷による破壊試験であり，層間剥離及び層間摩擦の AE 波を検知した．ここでは落錘衝撃による炭素繊維複合材の AE 波検出について測定を行った．衝撃における炭素繊維複合材の破壊モードは，静的面外負荷で発生するモード II 型が先に生じ，そこからモード I 型の開口が生じる．その後圧縮側で局所的な微小座屈が生じるとともにモード I 型の層間剥離が複数の層間で発生することが報告されている⁽²²⁾．また，衝突時の振動も加わるため，様々な周波数が検出されると考えられる．その状況下の中で AE 波の信号を検出できるかどうかを調査する．JIS K 7084⁽²⁶⁾に定められた試験法に試験方法として落錘子 2300 g，球体半径 40 mm を用いて高さ 1 m から落下させ，炭素繊維複合材に衝撃を与え，発生する AE 波の検出を試みる．その際衝撃による振動を緩和させるため，ハイパスフィルタを接続している．落錘衝撃による測定方法を図 2.22 に，測定結果を図 2.23 に示す．

AE 検出 1 では約 50 kHz の波形が，AE 検出 2 では約 60 kHz の波形が検出された．これらの周波数は炭素繊維複合材が樹脂割れをしたときに発する AE 波の範囲内に収まっており，衝撃を与えた炭素繊維複合材にも同様のものが現れていた．AE 検出 3 では約 200 kHz の波形が検出されており，層間剥離を起こした際に発する AE 波の範囲内に収まっていた．また，炭素繊維複合材の方でも層間剥離を起こしている個所を確認した．また，測定結果でも衝撃による振動はハイパスフィルタによって除去されていることを確認した．以上の結果から BOF センサを用いて構造体の AE 波検出の適用に期待ができると考えられる．

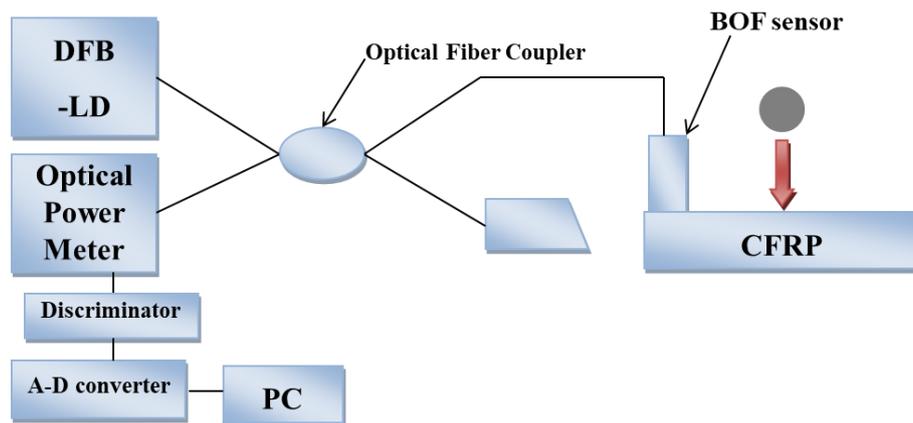
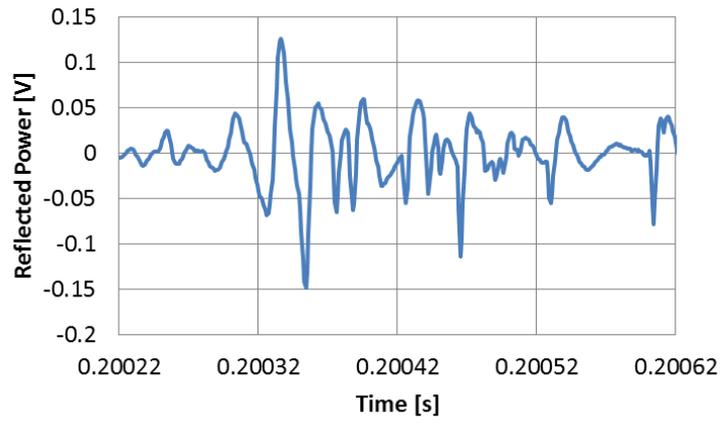
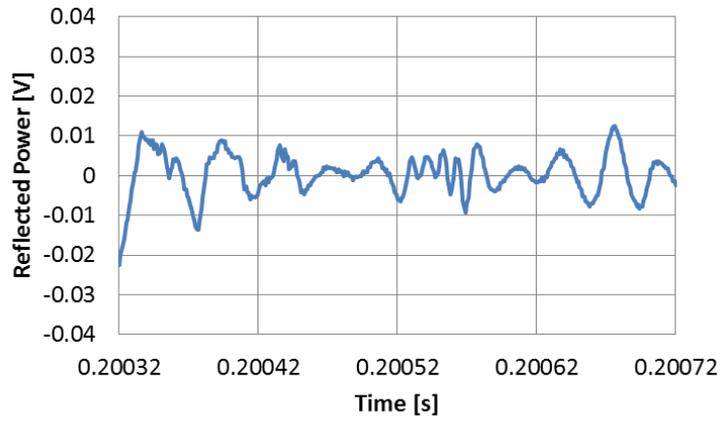


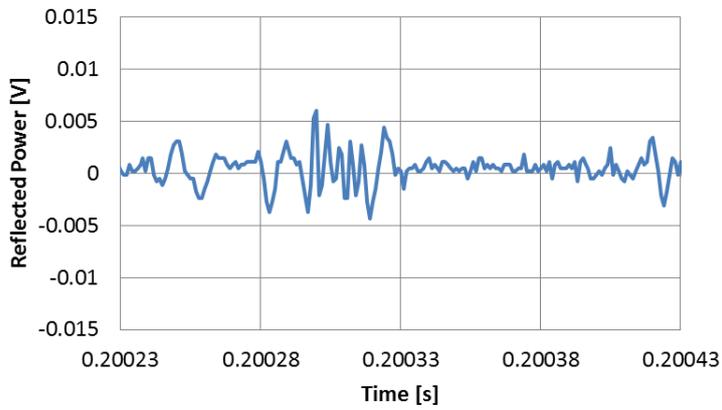
図 2.22 落錘衝撃による測定方法



(A) AE 波検出 1



(B) AE 波検出 2



(C) AE 波検出 3

図 2.23 測定結果

2.6 破壊試験におけるコンクリートの AE 波測定

2.6.1 コンクリート試験片の作成について

コンクリートはセメントペースト、細骨材、粗骨材の三種類で構成されているが、今回は試験機の都合上セメントペーストと鉄筋コンクリートを模した針金入りで行う。水セメント比が 0.5、セメントペーストの 20×45×220 mm の角柱試験片を作製し、破壊試験における AE 波測定を行った。型枠を図 2.24 に示す。試験片の作製手法としてセメント全量と水量の半分を加え混練り 3 分、残りの水を加えさらに 3 分間混練りを行い、80 分後に 10 分間混練りを行い型枠に打ち込んでいる。このとき、金属棒は 10 mm の位置に設置している。打ち込みから 2-3 時間後に上面を均し、ポリエチレンシートで覆い、翌日に脱型した後に 2 週間の水中養生を行った⁽²⁷⁾。

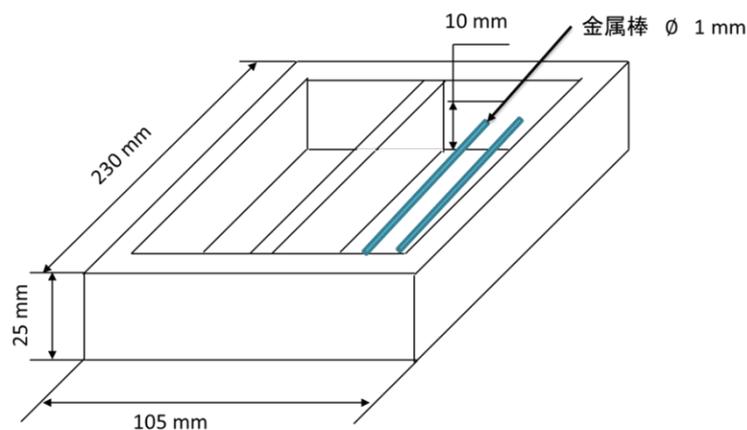


図 2.24 型枠(右：コンクリート用，左：鉄筋コンクリート用)

2.6.2 3点曲げ破壊における AE 波検出

2 週間の養生期間を終えたコンクリート試験片を破壊し AE 波を発生させ、BOF センサとピエゾ式 AE センサを用いて AE 波検出を試みた。3 点曲げ試験による試験片の破壊方法として、JIS A 1106⁽²⁸⁾に定められた測定手法により測定を行う。BOF センサの固定方法は試験片に固定治具で固定し、BOF センサと試験片の間にグリスやワセリンを塗布した後、ばねを用いて試験片と接触させる構造とした。また、BOF センサ、ピエゾ式 AE センサはコンクリート試験片の中心から 80 mm に設置し、両者の増幅器を 40 dB に設定した。コンクリート破壊試験及び AE 測定方法を図 2.25 に、コンクリート試験片の AE 測定結果を図 2.26、鉄筋コンクリート試験片の AE 測定結果を図 2.37 に示す。

図 2.26 より最初の信号はコンクリートが破断したときに発した AE 波であり、次の信号はコンクリートが治具に衝突したときの振動であるが、両者とも同タイミングで AE 波を検知している。また図 2.27 も同様にコンクリートがひ

ひ割れしたときに発した AE 波を検知し，その後の荷重負荷により発生したひ割れ，破損時の AE 波の測定を行えている。

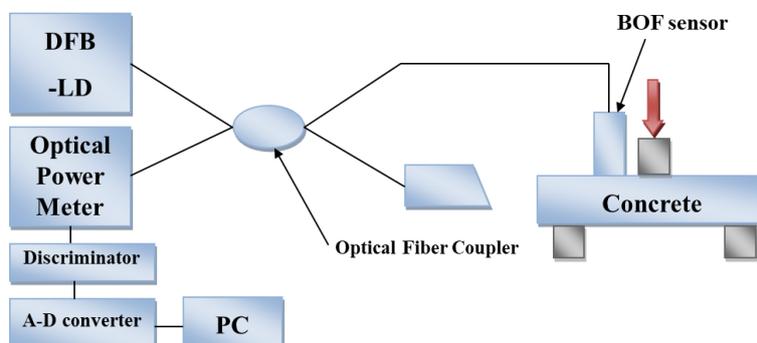
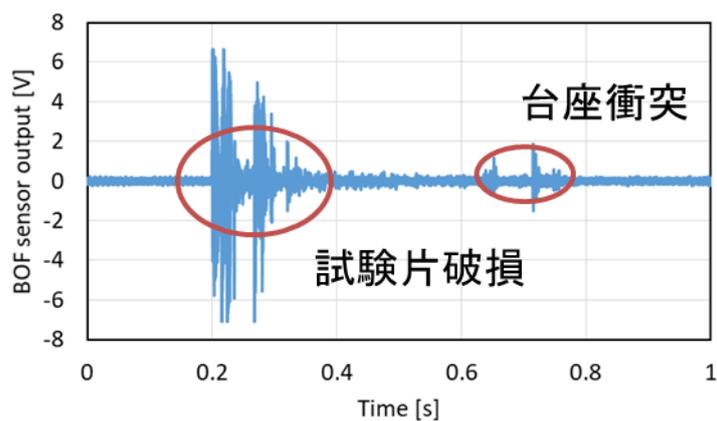
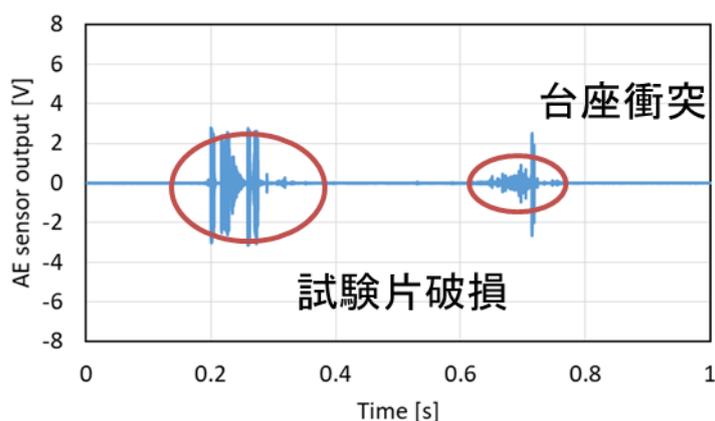


図 2.25 コンクリート破壊試験及び AE 測定方法

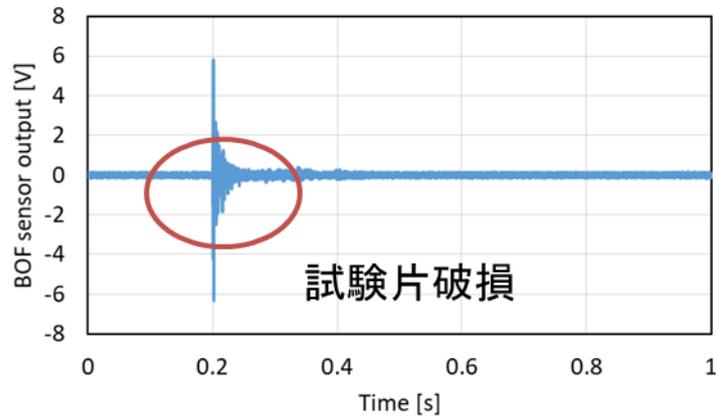


(a) BOF センサ

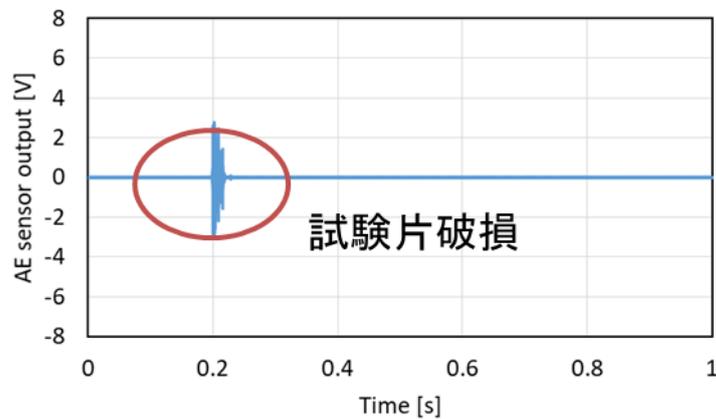


(b) AE センサ

図 2.26 コンクリート AE 波測定結果



(a) BOF センサ



(b) AE センサ

図 2.27 鉄筋コンクリート試験片測定結果(一例)

2.7 第2章のまとめ

本章では温度用 BOF センサを用いて構造体が発する AE 波の検出を目的として、BOF センサの荷重に対する反射スペクトルの変化及び周波数特性について調査を行うとともに建築個物に多く使用されているコンクリートや様々な AE 波が放出する炭素繊維複合材を用いて静的な面外負荷による手法、単一破壊モードによる AE 検出、落錘衝撃による AE 検出について測定を試みた。

まず BOF センサの荷重に対する反射スペクトルの変化について、BOF センサに荷重を印加させ反射スペクトルの測定と有限要素解析を行った。その結果、荷重が増加するごとに反射スペクトルは短波長側にシフトすることを確認した。しかし、反射スペクトルシフト量が温度によるシフト量に比べて小さく、ヘルツの弾性接触および研磨後の頂点ずれの影響によるものと考え、有限要素解析を用いて FIX スタブの中心の変形量を解析したところ、 $50\ \mu\text{m}$ の頂点ずれを有し

ている場合、中心に接触するまでに 2 N の押圧力が必要であることを確認した。このことからヘルツの弾性接触と頂点位置によって中心の横傾が変化することから絶対値を必要とする荷重測定には向いていないことを確信した。

次に振動は周期性を持った荷重としてとらえることができ、反射光強度も同様に周期的に変化するため、振動検出が可能となると予測したため周波数特性についてピエゾ式 AE センサとの接触方式による周波数特性を調査した。その結果 1000 kHz まで検出することが可能であることから非可聴域の AE 波を検出できることが判明した。

次に炭素繊維複合材では、静的な面外負荷による炭素繊維複合材の AE 波検出としてセンサと圧子の距離 d は 80 mm に設置し、炭素繊維複合材に一定時間荷重負荷を印加した状態で放置し、その都度発生する AE 波の測定の 2 種類の測定を行ったところ、AE 波を検出した。炭素繊維複合材に大規模な破壊は見られないが、得られた AE 波の周波数は約 160~200 kHz を示しており、層間内に発生した剥離だと考えられる。また、層間剥離を意図的に起こした炭素繊維複合材にアルミ板を挟み押す方ことで層間剥離を進展させる手法を用いて、AE 波を発生させたところ、検出された AE 波の周波数は 150~250 kHz を示しており、一定荷重負荷で得られていた周波数とほぼ一致していることから一定荷重負荷時で発生していた AE 波は層間剥離によるものと断定した。

最後に落錘衝撃による炭素繊維複合材の AE 波検出について検出を試みたところ、約 50 kHz、約 60 kHz、約 200 kHz の波形が検出され、これらの周波数は炭素繊維複合材が樹脂割れ及び層間剥離を起こした際に発する AE 波の範囲内に収まっており、炭素繊維複合材の方でも樹脂割れや層間剥離を起こしている個所を確認した。

最後に水中養生期間を 2 週間、水セメント比を 0.5 に設定したコンクリート試験片を作製し、JIS A 1106 に規定されたコンクリート曲げ強度試験による破壊試験での各試験片の AE 波測定を試みたところ、コンクリート試験片では同じタイミングで AE 波の検出、鉄筋入りコンクリートではひび割れ、破損時の AE 波の検出を確認した。

以上より BOF センサにより炭素繊維複合材、コンクリートの AE 波を測定可能であることを確認し、分岐光線路に組み合わせてセンサとして利用していくことが期待できる。

第2章の参考文献

- (1) 土門齋, 越出慎一, “やさしい非破壊検査技術,” 工業調査会, pp162-171, 1996.
- (2) S. Onoda, N. Tsukamoto, M. Ogino, K. Yamashita, O. Yumoto, K. Inoue, Y. Komatsu, ” A Proposal of Temperature Sensing Using a Thin-Film Bandpass Filter and Dual-Wavelength Push–Pull Reflectometry,” 19th International Conference on Optical Fibre Sensors, vol.20, no.9, pp688-690, 2008.
- (3) Y. Komatsu, K. Inoue, M. Nakano, S. Onoda, ” Optical fiber temperature sensor using a thin film band pass filter and dual wavelength push-pull reflectometry,” 19th International Conference on Optical Fibre Sensors, vol.7004,2008.
- (4) 浅野秀樹, 坂本明彦, 和田正紀, 竹内宏和, 吉原聡, ” 融着法による結晶化ガラス製超耐熱ファイバスタブの開発(I),” 電子情報通信総合大会 C-3-99, pp239, Mar, 2003.
- (5) 下川房男, “スパッタ蒸着,” 光デバイス精密加工ハンドブック 板生清他編 オプトロニクス社, pp.190-194, 1998
- (6) R. Nagase, Y. Takeuchi, S. Mitachi, ” Optical connector with glass-ceramic ferrule,” Electron. Lett., vol. 33, no. 14, pp. 1243-1244, 1997.
- (7) 小檜山光信, “光学薄膜フィルターデザイン-第2章反射防止膜-,” オプトロニクス社, pp. 62-88, 2006.
- (8) 山崎努, 宮入圭一, ” 反応性スパッタ法により作成した TaOx 薄膜の光学的特性,” 電子情報通信学会技術研究報告 CPM93-72, vol.93, no.223, pp19-23, 1993.
- (9) 小松康俊, 山口正剛, 中野正行, 斧田誠一, “BOF(Band-pass filter On Fiber-end)のポストアニールによる中心波長変化,” 電子情報通信学会技術報告 EMD2009-51, vol. 109, no.173, pp. 129-134, 2009.
- (10) S. Yoshioka, S. Kinoshita, Elsevier, ”Structural Color in Nature: Basic Observation and Analysis,” in Pattern Formation and Oscillatory Phenomena Chapter 6, pp. 199-251, 2013
- (11) 斧田誠一, 中野正行, 黒木保, 長瀬亮, “BOF の温度及び圧力印加による反射スペクトル,” 電子情報通信総合大会 CS-4-4, 2007.
- (12) 松井 伸介, 大平 文和, 小藪 国夫, 松永 和夫, ” 光ファイバの端面研磨と加工変質層,” 精密工学会誌, vol.64, no.10, pp1467-1471, 1980
- (13) 境目賢義, “マルチコアファイバ用光コネクタの構造創成と設計に関する研究”, 千葉工業大学博士学位論文, 2018.
- (14) A. Sakamoto, “Development of Li₂O-Al₂O₃-SiO₂ Glass-Ceramic with Drawing

Formability and Application to Fiber-Optic Devices,” 長岡技術科学大学博士論文, pp89, 2006.

- (15) K. Shikama, Y. Abe, S. Yanagi and T. Takahashi, “Physical-contact conditions for multicore fiber optical connectors,” in Proc. OSA Publishing OFC2013 OM3I, pp.OM3I-1 (2013).
- (16) エヌエフ回路設計ブロック技術資料, “AE の基礎,” AE(アコースティックエミッション)の基礎と測定方法 ,2002
- (17) JIS C 613003-6, “光ファイバ接続デバイス及び光受動部品—基本試験及び測定手順—第 3-6 部：反射減衰量測定,”
- (18) 山口晃司, 「炭素繊維複合材料の技術史と将来展望,” vol.134, no.6, pp360-363, 2014.
- (19) 明嵐政司, 西崎到, 木嶋健, “佐々木巖繊維強化プラスチックの橋梁への適用事例に関する研究,” 土木学会 FRP 橋梁に関するシンポジウム論文集, pp13-18, 2001.
- (20) 石川 敏之, “鋼橋の CFRP 板接着補修・補強の現状と課題,” 日本接着学会誌, vol. 45, no. 4 , pp139-144, 2009.
- (21) 清水信彦, 「炭素繊維複合材料(CFRP)の開発状況について,” レーザー研究, vol.38, no.8, pp60.-608, 2010.
- (22) 千葉工業大学研究成果報告, 「エネルギー・航空運輸機器の安全性向上に資する高精度マルチスケール損傷評価体系の構築成果報告—平成 27 年度成果報告 7—,” 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業, 2016.
- (23) 鈴木恵, 中西博, 岩本正治, 自念栄一, 前川善一郎, 森旭, 孫峰, 「AE 法による CFRP の破壊機構に関する研究,” 日本機械学会論文集 A 編, vol.53, no.492, pp1459-1466, 1987.
- (24) 宅間正則, 新家昇, 鈴木健, 藤井俊行, “AE 信号のウェーブレット変換による FRP 積層板の曲げ疲労損傷評価—フラクタル次元とニューラルネットワークの適用—,” 精密工学会誌 vol.68, no.10.2002.
- (25) JIS K 7074, “炭素繊維強化プラスチックの曲げ試験方法,”
- (26) JIS K 7084, “炭素繊維強化プラスチックの 3 点曲げ衝撃試験方法,”
- (27) 川上英男, “セメントペースト及びモルタルの弾性係数と材齢の関係,” コンクリート工学年次論文集, vol.27, no.1, pp349-354, 2005
- (28) JIS A 1106, “コンクリートの曲げ強度試験方法,”

第 2 章に関連する学会発表および論文

- (1) 松田健太郎, 仲川雄大, 長瀬亮,” BOF を用いた光ファイバセンサによる圧力測定,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 112, no. 181, EMD2012-58, pp. 153-156, 2012

- (2) 松田健太郎, 長瀬亮, ”BOF を用いた光ファイバセンサによる圧力測定(2),” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 113, no. 187, EMD2013-45, pp. 57-60, 2013
- (3) 松田健太郎, 長瀬亮, ”BOF を用いた光ファイバセンサによる圧力測定(3),” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 113, no. 438, EMD2013-148, pp. 47-50, 2014
- (4) 松田健太郎, 長瀬亮, ”BOF を用いた光ファイバセンサによる荷重測定の温度依存性,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 114, no. 184, EMD2014-57, pp. 151-154, 2014
- (5) 松田健太郎, 長瀬亮, ”BOF を用いた光ファイバセンサによる圧力測定(4),” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 114, no. 412, EMD2014-106, pp. 23-26, 2015
- (6) 松田健太郎, 根本伊織, 長瀬亮, ”BOF を用いた光ファイバセンサによる圧力測定(5),” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 115, no. 195, EMD2015-57, pp. 129-132, 2015
- (7) 松田健太郎, 原峻太, 長瀬亮, ”光ファイバによる水中音響測定,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 116, no. 55, EMD2016-5, pp. 25-28, 2016
- (8) 松田健太郎, 長瀬亮, ”MU 簡易レセプタクルを用いた BOF センサ,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 116, no. 192, EMD2016-39, pp. 81-86, 2016
- (9) 松田健太郎, 長瀬亮, ”BOF を用いた光ファイバによる高温測定への試み,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 116, no. 439, EMD2016-82, pp. 65-68, 2017
- (10) 原峻太, 松田健太郎, 長瀬亮, ”BOF を用いた光ファイバによる水中音響測定に関する研究,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 116, no. 492, EMD2016-108, pp. 37-40, 2017
- (11) 松田健太郎, 長瀬亮, ”蒸着膜を形成した光ファイバ端面の熱ひずみの解析,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 186, EMD2018-20, pp. 1-4, 2018
- (12) 松田健太郎, 長瀬亮, ”光ファイバを用いた炭素繊維複合材の AE 波検出の試み(1)～光ファイバセンサの周波数特性～,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 186, EMD2018-20, pp. 1-4, 2018
- (13) 末永克樹, 松田健太郎, 長瀬亮, ”光ファイバを用いた炭素繊維複合材の AE 波検出に関する研究,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 186, EMD2018-20, pp. 1-4, 2018
- (14) 松田健太郎, 長瀬亮, ”光ファイバセンサを用いたマルチスケールとヘルスマモニタリングシステムに関する研究～蒸着膜を形成したファイバ端面

- の熱ひずみ解析～,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 186, EMD2018-20, pp. 1-4, 2018
- (15) 末永克樹, 松田健太郎, 長瀬亮,” 光ファイバを用いた炭素繊維複合材の AE 波検出に関する研究(2),” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 186, EMD2018-20, pp. 1-4, 2018
- (16) 末永克樹, 松田健太郎, 長瀬亮,” 光ファイバを用いた炭素繊維複合材の AE 波検出に関する研究 (3) ,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 186, EMD2018-20, pp. 1-4, 2018
- (17) 高橋遼, 末永克樹, 松田健太郎, 長瀬亮,” BOF を用いた超音波振動検出の試み,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 186, EMD2018-20, pp. 1-4, 2018
- (18) 末永克樹, 松田健太郎, 長瀬亮,” 光ファイバを用いた炭素繊維複合材の AE 波検出に関する研究 (4) ,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 186, EMD2018-20, pp. 1-4, 2018
- (19) 松田健太郎, 長瀬亮,” BOF センサを用いた圧力測定精度の向上に関する研究,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 186, EMD2018-20, pp. 1-4, 2018
- (20) 高橋遼, 末永克樹, 松田健太郎, 長瀬亮,” BOF を用いた炭素繊維複合材の衝撃負荷時における AE 波検出の試み,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 186, EMD2018-20, pp. 1-4, 2018
- (21) 松田健太郎, 江田涼人, 今泉可津貴, 長瀬亮,” 標準外径マルチコアファイバ用光コネクタのフェルール端面微小変形解析,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 186, EMD2018-20, pp. 1-4, 2018
- (22) 末永克樹, 松田健太郎, 長瀬亮,” 光ファイバを用いた炭素繊維複合材の AE 波検出に関する研究 (5) ,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 186, EMD2018-20, pp. 1-4, 2018
- (23) 高橋遼, 松田健太郎, 長瀬亮,” 光ファイバを用いた炭素繊維複合材の AE 波検出,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 186, EMD2018-20, pp. 1-4, 2018
- (24) 松田健太郎, 今泉可津貴, 長瀬亮,” 標準外径マルチコアファイバ用光コネクタのフェルール端面微小変形解析 (2) ,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 186, EMD2018-20, pp. 1-4, 2018
- (25) K. Matsuda and R. Nagase “Pressure sensing technique using Band-pass filter on fiber-end” in Proc. ICPT2014, P2-27MS, pp426-429, nov.2014.
- (26) K. Matsuda and R. Nagase “Pressure and temperature sensing technique using Band-pass filter on fiber-end” in Proc. ICPT2018, nov.2018.

- (27) 松田健太郎, 今泉可津貴, 長瀬亮,” 標準外径マルチコアファイバ用光コネクタフェルール端面の微小変形解析,” エレクトロニクス実装学会誌, vol. 24, issue. 1, pp. 148-153, 2021

第3章 標準 SMF を用いた簡易ひずみセンサの構造設計

3.1 はじめに

長寿命化計画の一環として光ファイバセンサを活用したヘルスマモニタリングの研究，試験運用が行われており，その中で最も多く用いられているのが FBG センサである．FBG センサは数 mm に渡って被覆を除去した後，コア部に回折格子を刻み，フィルムで露出した光ファイバを保護したものであり，熱や応力負荷によって FBG のスペクトルが長波長あるいは短波長側に移動する特性を有しており，様々なところで研究や実用化が進み，ひずみ測定では優れた性能を有している⁽¹⁾．

FBG センサは図 3.1 に示すように製造段階で被覆除去を行う関係上，クラッド表面に微細なクラックを生成する．強度保持のためフィルム等で保護を行うが，生成されたクラックが引っ張り，膨張などにより進展し破断する可能性がある．また，FBG センサの反射スペクトルは中心波長を設定することで複数のセンサを 1 つの装置で測定することが可能であるが，そのためには複数の波長を搭載した光源あるいは，可変機能を有する光源や，それぞれに対応した受光装置を使用する必要がある．

よって本項は標準 SMF を用いて長期信頼性を重視し，光ファイバの曲率半径の変化に伴う光損失による光ファイバセンサの構造設計を検討する．光損失はファイバの軸ずれ，角度ずれ，局所曲げなど容易かつ単純な手法で発生することができる⁽²⁾⁽³⁾が本章では曲げを用いた光ファイバセンサの作製を行う．軸ずれ，角度ずれによる光損失は機構の作製及び調整が難しく，間に異物が入り込むと後半のセンサが機能しないことや構造体に設置する際にセンサ自体が巨大化する可能性があると考えられる．一方曲げによる光損失は曲率半径を変化させることで光損失の変動を発生させることが可能である．

曲率半径変化に伴う光損失をセンサとして活用するため，センサ部以外での損失は極力抑制する必要がある．そこで IEC60793-2-50 : 2015 Category B6 光ファイバを用いて，JIS C 6823 における曲げ損失試験 1/4 円曲げ法を参照し，曲率半径変化に伴う光損失変動，偏波依存損失について調査を行う．その調査結果を基に光ファイバ型ひずみセンサを作製し，光損失変動，偏波依存損失，ひずみに対する利得光損失の測定を行い，光ファイバ型ひずみセンサの有用性について評価した．また，有限要素解析を用いて作製した光ファイバ型ひずみセンサ内の光ファイバの変形を解析し，実測値と比較を行う．

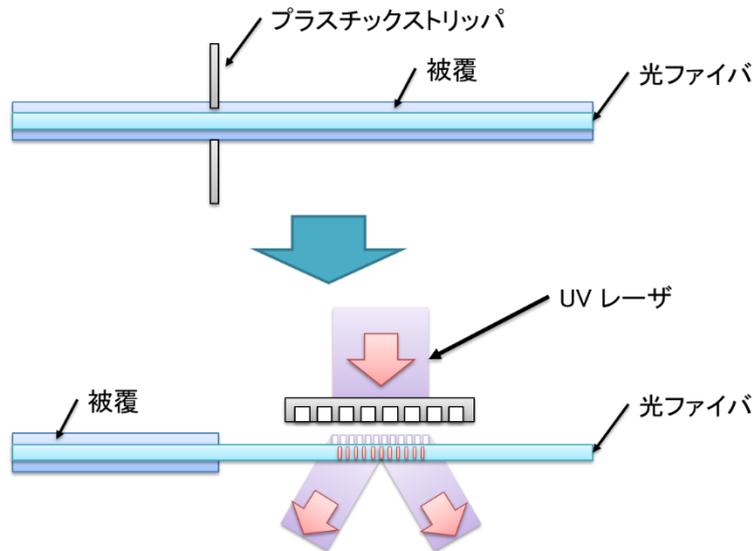


図 3.1 FBG 製造工程

3.2 曲率変化による光損失変動，信頼性，偏波依存損失について

3.2.1 光ファイバの曲がり部信頼性について

本章では光ファイバの曲率半径変化により発生する光損失を用いた光ファイバセンサの作製を目的としているが，曲率半径が小さくなるほど光ファイバは破断する確率が増加する．このことから光ファイバの曲がり部信頼性について検証を行う必要がある．

光ファイバは OVD, MCVD, VAD 法より製造されたプリフォームを線引炉に先端部から徐々に挿入して作製されている．2000 °C 以上の線引炉により先端が軟化し，自重で落下すると炉の下でファイバを巻き取る．このとき，炉の直下に設置している外径測定器を用いてクラッド外径の測定を行うことで，ファイバの巻き取り速度とプリフォームの挿入速度を調整している．光ファイバの表面には微細なクラックがランダムに存在し，長時間の応力負荷によりクラックが成長し破断する．この破断をある程度防ぐため製造工場では 100 本以上の光ファイバを用いて引張試験を行っている．この引張試験の結果より長期信頼性の低下を低減するため，液状樹脂をファイバに塗布した後，硬化炉によってファイバ表面に被膜を構成し保護を行い，ファイバ化後に一定荷重をかけることで低強度部を除き，高強度な光ファイバを製造している⁽⁴⁾．

光ファイバの強度分布は単純なワイブル分布ではなく高強度領域と低強度領域の 2 つからなっている．高強度領域はガラス固有の強度であり，低強度領域は光ファイバ中の欠陥や表面のクラックに起因する．このモデルとクラックの成長速度が応力拡大係数に比例する前提として破断確率に基づく信頼性理論が構築⁽⁵⁾されており，光ファイバの国際基準化や配線設計に用いられている．光フ

ファイバの線引工程を図 3.2 に示す．光ファイバ強度の累積分布を図 3.3 に示す．

基礎となる理論式は Mitsunaga 等⁽⁶⁾が、高強度範囲を含めた理論式を Griffioen, Matthisse 等⁽⁷⁻⁸⁾が、さらに常温、高温及び曲げに対する理論式を立蔵氏等が提案している．立蔵氏が提案した累計破壊確率理論式⁽⁹⁾を(3-1)式に示す．（ L_0 ：ファイバ単位長， $C_{bi}L$ ：引張負荷条件時の等価長， L_s ：光ファイバサンプル長， t_α ：曲がり部印加時間， t_p ：プルーフ印加時間， σ_α ：光ファイバ表面最大応力， σ_p ：プルーフ応力， n ：応力拡大係数， m ，ワイブル分布の係数）

$$F = 1 - \exp \left\{ -\frac{C_{bi}L}{L_0} \left[\left(\frac{\sigma_\alpha^n t_\alpha + \sigma_p^n t_p}{\beta_1} \right)^{\frac{m_1}{n-2}} - \left(\frac{\sigma_p^n t_p}{\beta_1} \right)^{\frac{m_1}{n-2}} \right] - \frac{L}{L_s} \left[\left(\frac{\sigma_\alpha^n t_\alpha}{\beta_s} \right)^{\frac{m_2}{n-2}} \right] \right\} \dots (3-1)$$

ここで σ_α ， β_1 ， β_s は(3-2)(3-3)(3-4)式で表している．（ E :縦弾性係数， d :ファイバ外径， R :曲げ半径， N_p :プルーフトテスト時単位長さあたりの破断率， t_f :曲げによる最大応力時の破断時間）

$$\sigma_\alpha = E \frac{d}{2R} \left(1 + \frac{9}{4} \cdot \frac{d}{2R} \right) \dots \dots \dots (3-2)$$

$$\beta_1 = \frac{\sigma_p^n t_p}{(L_0 N_p)^{\frac{n-2}{m_1}}} \dots \dots \dots (3-3)$$

$$\beta_s = \sigma_\alpha^n \cdot t_f \dots \dots \dots (3-4)$$

以上の式を用いて光ファイバ製造メーカーは機械的強度に関する信頼性寿命を予測している⁽¹⁰⁾．立蔵氏が光ファイバの遅れ破壊の温度依存性から得られたパラメータを元に 20 年後の曲げによる累計破壊確率計算結果を図 3.4 に示す．

図 3.4 より曲率半径が 2~3 mm であると累計破壊率が急激に増加しているが、曲げ損失で決めた曲率半径は 3.5 mm 以上であり、70 °C の環境下でも累計破壊率は 0.001% と小さいことから 3.5 mm 以上でも問題ないと考えられる．

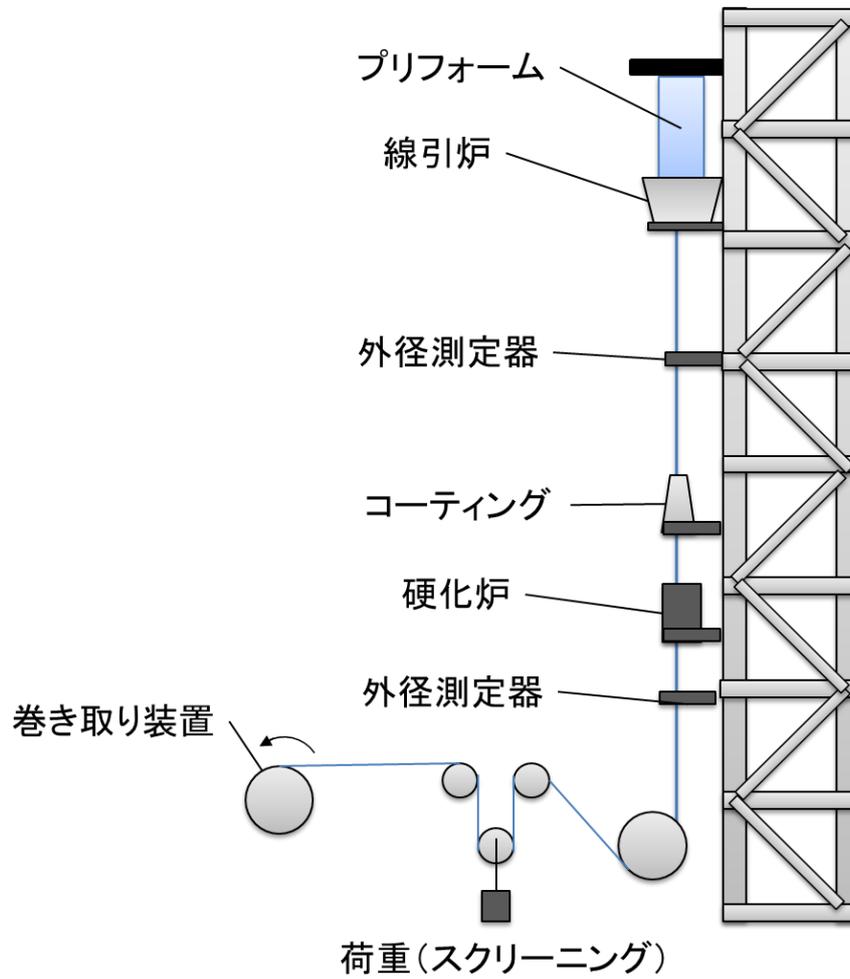


図 3.2 光ファイバの線引工程

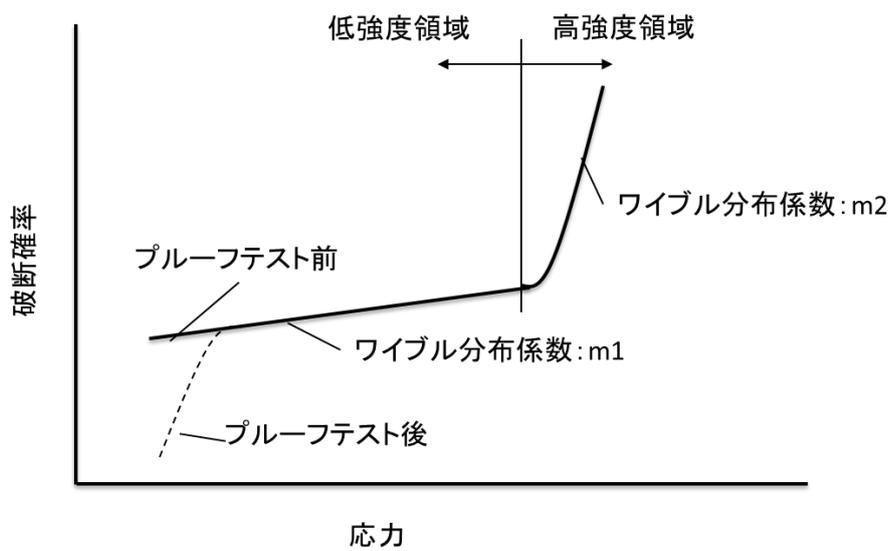


図 3.3 光ファイバ強度の累積分布

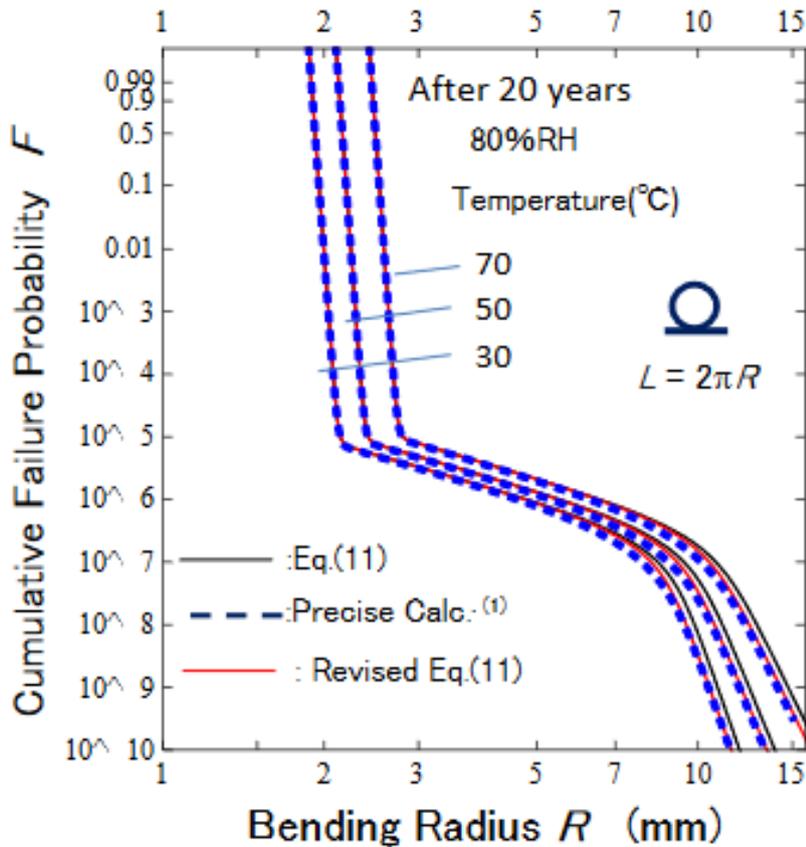


図 3.4 曲げ半径及び温度変化による故障確率⁽⁸⁾

3.2.2 曲率変化による光損失変動について

3.2.1 項では光ファイバの故障確立と曲率半径の関係を確認したので、曲率半径変化と光損失の関係について調査する。光ファイバ内の信号はクラッドとコアの境界面を反射することで通信が可能であるが、光ファイバに曲げを与えると境界面上の入射角が変化し、コア内の光がクラッド内に漏洩し、曲率半径が小さくなるほど光損失量が増加する。光ファイバに曲率を与えた時の光損失の値は Marcuse の式⁽¹¹⁾より求めることができる。光ファイバのコアとクラッドの屈折率を n_1 , n_2 , 光の周波数を k , 光の伝搬角度を θ とすると、光ファイバの内の光の伝搬定数 β_g は以下の式で表すことができる。

$$\beta_g = kn_1 \cos \theta \dots \dots \dots (3-5)$$

また、コアにおける光の軸方向の伝搬定数 κ とクラッドにおける光の軸方向の伝搬定数 γ , 規格化周波数 V は式で表すことができる。

$$\kappa = (n_1^2 k^2 - \beta_g^2)^{1/2} \dots \dots \dots (3-6)$$

$$\gamma = (\beta_g^2 - n_2^2 k^2)^{1/2} \dots\dots\dots (3-7)$$

$$V^2 = k^2 a^2 (n_1^2 - n_2^2) \dots\dots\dots (3-8)$$

光ファイバに曲げを与えた時の単位長さあたりの光損失 α は以下の式で求めることができ、(3-10)式を用いることで曲げの範囲分の損失を求めることができる。

$$2\alpha = \frac{\sqrt{\pi} k^2 \exp\left[-\frac{2}{3}(\gamma/\beta_g^2)R\right]}{2\gamma^{3/2} V^2 \sqrt{R} K_{\nu-1}(\gamma a) K_{\nu+1}(\gamma a)} \dots\dots\dots (3-9)$$

$$\text{Loss} = 10 \log_{10}(e) 2\alpha l \dots\dots\dots (3-10)$$

センサを作製する前段階として、IEC 60793-2-50 : 2015 Category B6 光ファイバ（古河電工製 Flexi Wave ファイバ）を用いて曲げ損失試験 1/4 円曲げ法(JIS C 6823)⁽¹²⁾による光損失の測定を行い(3-1)～(3-6)式を用いて両者の比較を調査する。B6 光ファイバは従来のシングルモードファイバと比ベコアクラッドの比屈折率差を大きくしており、許容曲げ半径が半分（15 mm）である⁽¹³⁾。光ファイバ中において光の全反射が起こる条件は、伝搬角 θ が臨界角 θ_c より小さいことである。臨界角 θ_c は

$$\theta_c = \cos^{-1} \frac{n_2}{n_1} = \sin^{-1} \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} = \sin^{-1} \sqrt{2\Delta} \quad (3-11)$$

で定義され、比屈折率差 Δ は

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \dots\dots\dots (3-12)$$

によって表すことができ、この比屈折率差が大きいほど許容される伝搬角が大きくなり、許容曲げ半径を小さくすることができ⁽¹⁴⁾、IEC 60793-2-50 : 2015 Category B6 では曲げ損失の影響を受けない SMF として規格化されている⁽¹⁵⁾。B6 光ファイバは機器の小型化や FTTH 等での引き込みや屋内配線などで多く用いられており、光ファイバセンサの小型化が可能ではないかと考えられる。曲げ試験方法として光ファイバに治具を使い R3 ~ 9 mm まで 1 mm 毎に曲率を与えた時の各曲率半径の光損失を測定する。曲げ損失試験 1/4 円曲げ方法を図 3.5 に測定結果及び理論値の比較を図 3.6 に示す。

図 3.6 より今回使用した光ファイバの曲げ損失の測定結果は理論値に近い値を示しており、曲率半径 3 mm より光損失が急増していることを確認した。本研

究で考案している分岐光線路によるモニタリングシステムは分岐数と短経路の測定レンジはトレードオフであり、初期損失が大きすぎる場合、短経路側に組み込むのが難しくなる。これを考慮した場合、許容できる光損失量は最大 3 dB 程度までと考えられる。また、曲率半径が小さすぎると、光ファイバが破断する恐れがあることから、曲率半径は 3.5 mm までなら許容することができると考えられる。

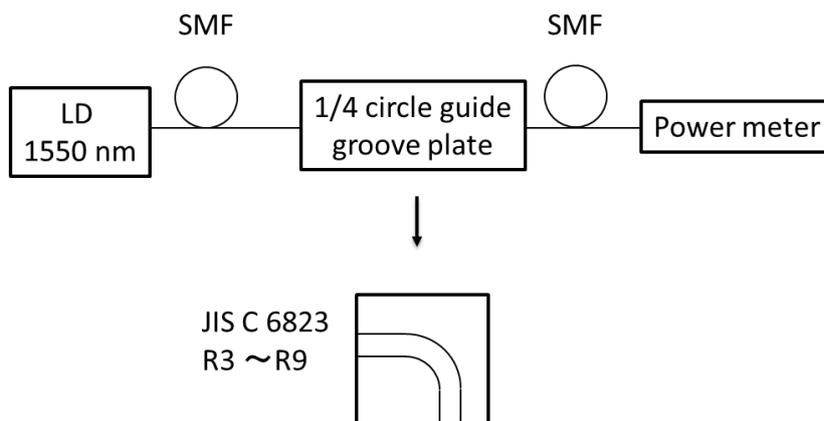


図 3.5 曲げ損失試験 1/4 円曲げ方法

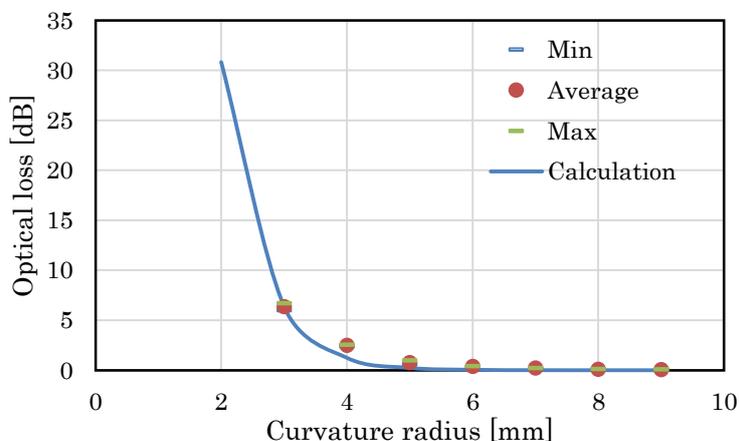


図 3.6 光損失シミュレーション及び測定結果

3.2.3 曲げによる偏波依存損失について

3.2.1 項では曲率半径と故障確立の関係を、3.2.2 項では曲率半径と光損失の関係を調査し、ともに 3.5 mm 程度であれば破断することはない、得られる光損失量も大きいことを確認したが、光ファイバは内部応力が生じると偏波依存性損失が発生するため、この調査を行う必要がある。光ファイバはファイバ断面内で直交する独立な 2 つの偏波モードが存在し、コア断面がファイバの長さ方向に

沿ってわずかな非対称性を持ち、ファイバの曲げによって外部から応力が加わると光ファイバ内部では複屈折が生じる。この複屈折が存在し、外乱により変動すると出力偏波状態はランダムに変動し、測定に影響を与える。そのことから偏波コントローラを用いて曲率半径の変化による偏波依存性損失(Polarization Dependent Loss : PDL)について測定を行う。

光ファイバ内の光波は電界と磁界が互いに直交しながら、進行方向とは垂直に電界方向が振動する横波であり、進行方向に対して垂直な断面で見たとき、電界がある決まった方向で記述できる場合、その光を偏光と呼ぶ⁽¹⁶⁾。そして光には偏光状態 (State Of Polarization: SOP) が存在する。SOPには、直線偏光・楕円偏光・円偏光があり、直線偏光を図 3.7 に、円偏光・楕円偏光を図 3.8 に示す。

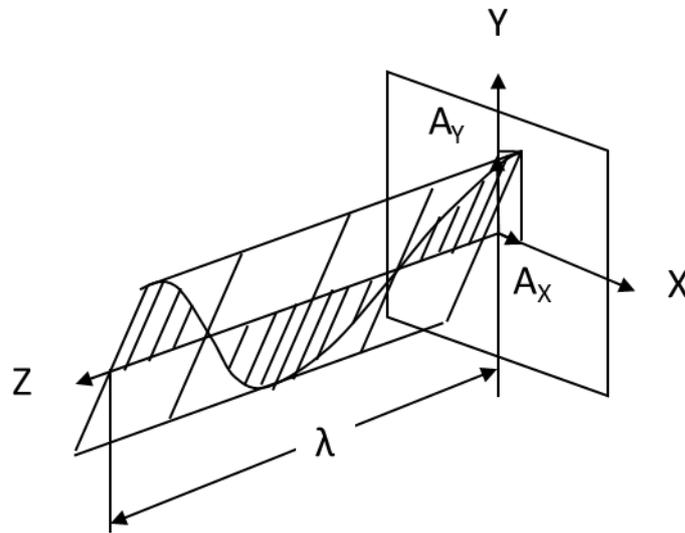


図 3.7 直線偏光

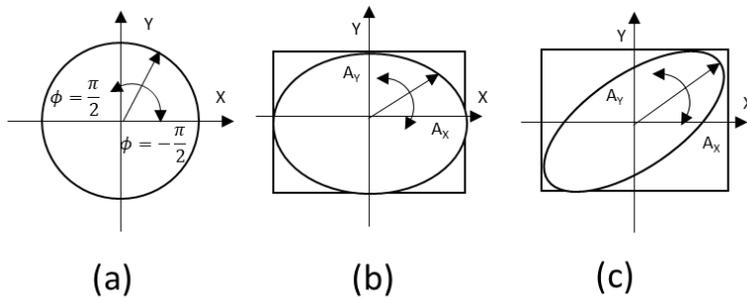


図 3.8 (a)円偏光 (b)(c)楕円偏光

光電界の両直行成分を

$$\begin{cases} E_x(x, y, z, t) = A_x \cos(\omega t - \beta z + \varphi_x) \\ E_y(x, y, z, t) = A_y \cos(\omega t - \beta z + \varphi_y) \end{cases} \dots (3-13)$$

と表し、かつ $\varphi_x - \varphi_y = \varphi$ とすると、上記の3種の偏光は

(1)直線偏光： $\varphi = 0^\circ$ または 180° ， A_x, A_y は任意

(2)円偏光： $A_x = A_y$ ，かつ $\varphi = \pm 90^\circ$

(3)楕円偏光： $A_x \neq A_y$ ， φ は任意

が成り立つ。

このように任意の SOP は A_x, A_y およびそれらの間の位相差 で決定される。ただし電界の振幅自体は SOP には含まれないので、 (A_y/A_x) および φ の二つが決まれば良いこととなる。図 3.9 に示すポアンカレ球は、上記の値を球面上の1点に対応させた SOP の表示法である。

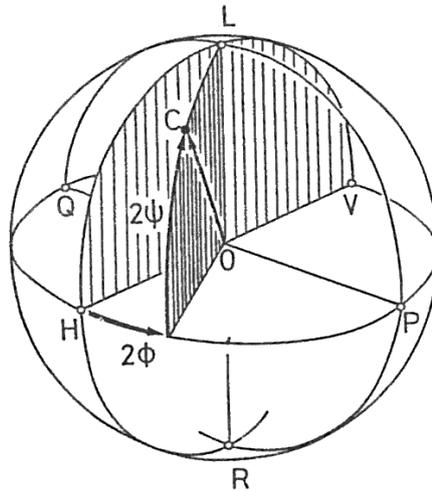


図 3.9 ポアンカレ球

偏波コントローラの内部は4つのファイバースコープで構成されており、それぞれ180回転を行うことですべての偏光状態を作り出し、被試験デバイスに入射することで被試験デバイスが有する偏波の変化を測定することができる。偏波依存損失は一定時間内の最大光強度 P_{max} と最小光強度 P_{min} の比として定義される。

$$Loss = 10 \log \frac{P_{max}}{P_{min}} \dots \dots \dots (3-14)$$

測定方法は 3.2.1 と同様の曲げ損失試験 1/4 曲げ法を用いるが治具と光源の間に偏波コントローラを接続し、75 秒の間にあらゆる偏波状態を取るよう設定した状態で出力光パワーの最大、最小値から偏波依存性損失を求める。光源は波長 1550 nm の FP-LD 光源を用い、光ファイバに曲げなしの状態から 9 mm から 3 mm まで 1 mm 毎に曲げを小さくしていき、その時の光パワーを 1000 点測定する。測定方法を図 3.10 に、測定結果を図 3.11 に示す。

測定結果から、曲げが小さくなることに反比例して偏波依存性損失も大きくなるのが分かる。これは光ファイバに曲げが与えられることで複屈折が発生し、曲率半径が小さくなるごとに内部応力が増加することで偏波による影響が大きくなっていると考えられる。また、センサを作製するにあたっての光ファイバの曲率半径は 5 mm 以上ならば偏波依存性損失も 0.1 dB 以下に抑えられるため影響は少なくなることから曲率半径が小さい円を用いて変化させるよりも曲率半径が大きく、複数個所に曲げを与える構造のセンサを作製した方が偏波による影響は小さくなるのではないかと考えられる。

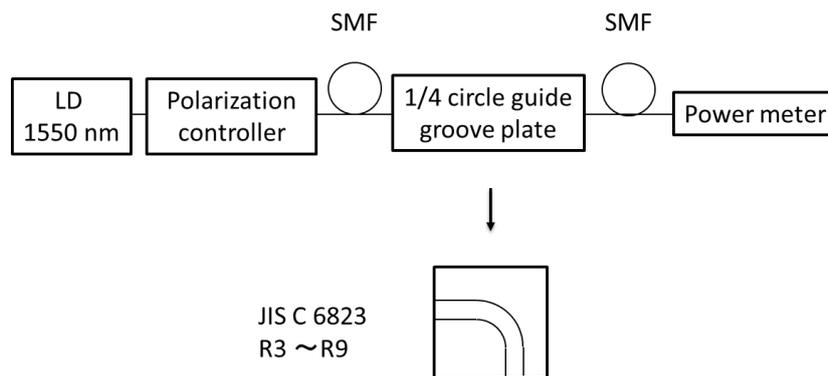


図 3.10 PDL 測定方法

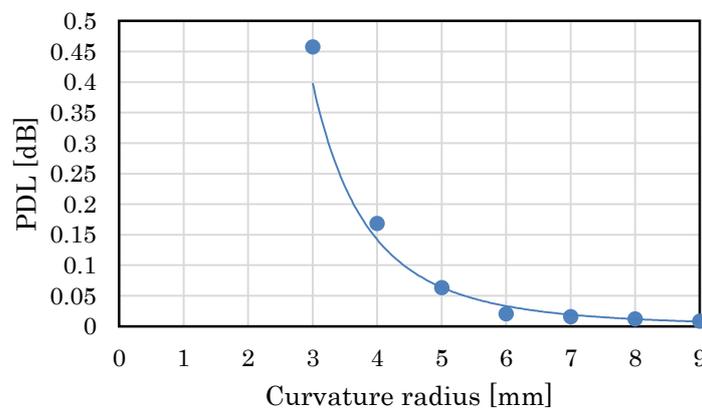


図 3.11 PDL 測定結果

3.3 光ファイバ型ひずみセンサの設計

3.3.1 光ファイバ型ひずみセンサの設計

光ファイバに複数個所の曲げを与えることができる構造を作製するため、有限要素解析を用いて一か所ごとの曲率半径の変化を解析し、光ファイバ型ひずみセンサの設計を行う。十分な光損失を得ることができる曲率半径は 3~5 mm であるが、偏波依存損失を考慮すると曲率半径は 5mm 以上が良いと 3.2 項で判明したことから一か所ごとの曲率半径が 5mm 以上の波状になるようにセンサの設計を行う。光ファイバに連続の曲げを与える方法としてアルミ板に固定したステンレスピンを用いて等間隔に設置し、シングルモードファイバを挟み込み、上から荷重を与え、曲げを維持した状態で接着剤を用いて固定する。センサの構造を図 3.12 に示す。

まず、光ファイバ型ひずみセンサを試作する前段階として、3 点支持による梁の単純曲げを用いて荷重に対する曲率半径を求めた。連続で湾曲している光ファイバの一部分を図 3.13 のように 3 点支持による梁の単純曲げと仮定すると、曲率半径は(3-14)の式で求めることができる⁽¹⁷⁾ (ρ :曲率半径, M :曲げモーメント, I :断面 2 次モーメント, E :縦弾性係数, l :ピン間隔, P :荷重)。 (3-14)~(3-16)式を用いてピン間隔と曲率半径の関係および得られる光損失の計算を行う。ピン間隔と曲率半径の関係を図 3.14 に、単位長さ当たりの光損失の理論値を図 3.15 に示す。

$$M_x = \frac{P}{2}l \dots\dots\dots (3-14)$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \dots\dots\dots (3-15)$$

$$\rho = \frac{EI}{M} \dots\dots\dots (3-16)$$

図 3.14 において、梁の長さを長めに設定すればわずかな負荷でたわみやすくなり、得られる曲率半径も小さくなり、図 3.15 に示すように得られる単位長さ当たりの光損失も増大している。このことから測定レンジを向上させるにはピン間隔を短縮し、測定感度を向上させる場合にはピン間隔を延長することで用途に合う光ファイバ型ひずみセンサを作製することが可能であることと考えられる。今回作製する光ファイバ型ひずみセンサは測定レンジを拡大するため、ピンの間隔を 3 mm に、得られる損失量を増加させるため、ピンの本数を 12 本設定した。

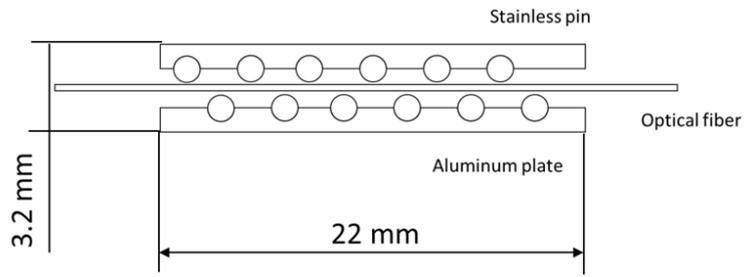


図 3.12 光ファイバ型ひずみセンサ

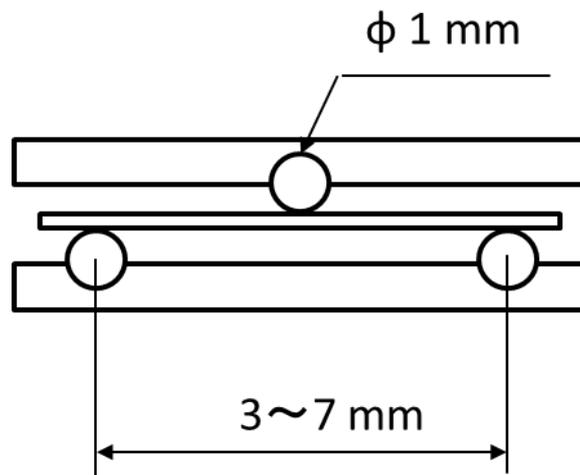


図 3.13 3点支持による単純曲げ

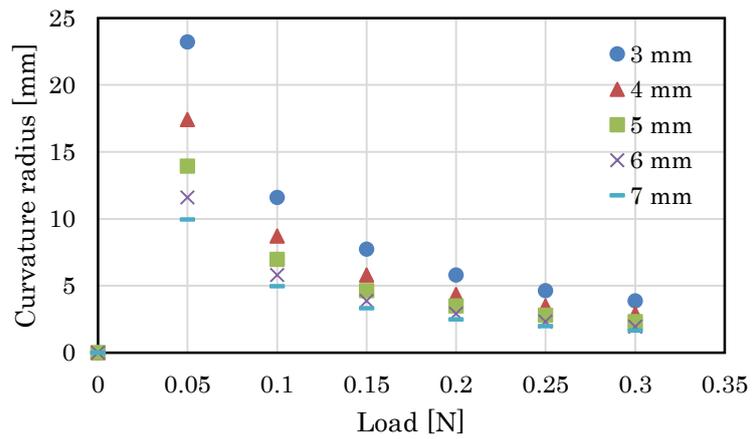


図 3.14 曲率半径計算結果

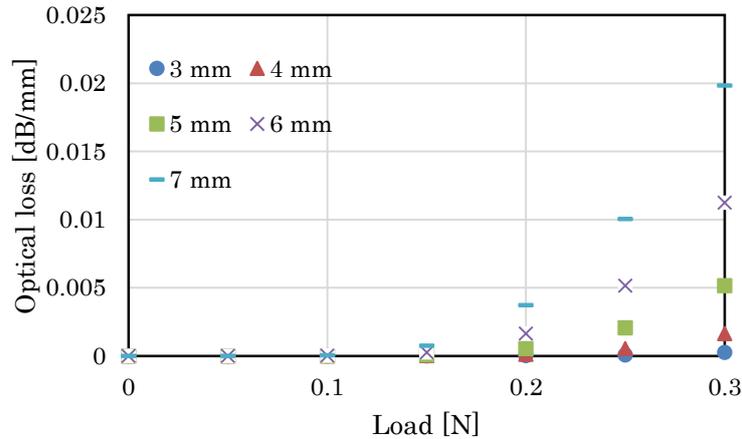


図 3.15 光損失計算結果

次に、光ファイバを作製した治具に接着固定を行う前に、作製したセンサの得られる光損失と偏波依存損失を測定し、有限要素解析を用いて理論値との比較を行う。光ファイバを簡易固定し、片方の治具をロードセルに設置して荷重を 3 N まで印加し、荷重に対する光損失と偏波依存損失の測定を行う。有限要素解析に使用する 3D モデルは 2 章の解析と同じく Autodesk Inventor によって作成し、有限要素解析ソフトの ANSYS に取り込んだ。3D モデルはアルミ板、ステンレスピンを固着させ、光ファイバとステンレスピンの側面を接触させた。この時ステンレスピンとファイバには摩擦あり（摩擦係数 0.2）の接触設定にしている。アルミ板の上部から荷重を Y 軸方向に与える条件で解析を行った。また、メッシュサイズについては SMF とステンレスピンを 5 μm に設定している。光ファイバ型ひずみセンサの解析モデルを図 3.16 に、測定方法を図 3.17 に、測定結果と理論値の比較を図 3.18 に、偏波依存損失測定結果を図 3.19 に、各部材の物性値を表 3.1 に示す。

図 3.18 の測定値と理論値の比較では 2.4 N まで概ね一致しているが、それ以降では一致していない。曲げによる光損失は、光ファイバ内に伝搬する光が曲げによりコアからクラッドに漏れることで発生する。しかし、曲げを与えている箇所が複数存在する場合、クラッドに漏れた光が再びコアに伝搬し、再結合を起こすため、与えた曲げと同等の光損失が発生しないことがある。作製したセンサはわずかな距離で連続曲げを与えているため、実際に発生する光損失より減少したのではないかと考えられる。図 3.19 では偏波依存損失が 3 N で急激に増加しているが 0.045 dB と小さいことから、測定値に影響を与えるのが少ないことを確認した。しかし、低荷重時の光損失の変動量が小さいことから、1.8 N の荷重を印加した状態で接着剤を塗布し、光ファイバ型ひずみセンサの試作を試みる。

表 3.1 各部材の物性値⁽¹⁸⁾

Material		Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio
Optical fiber	Silica glass	72	0.14
	UV curable resin	2.4	0.3
Pin	Stainless	197	0.3
Aluminum tape	Aluminum	69	0.3

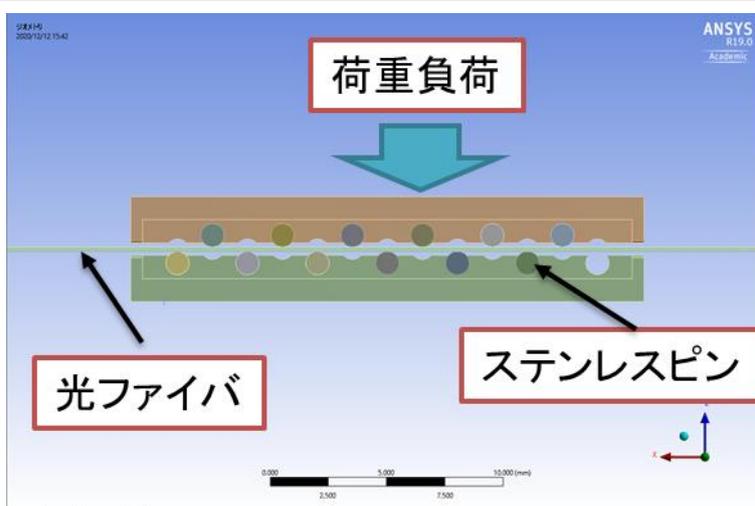


図 3.16 解析モデル

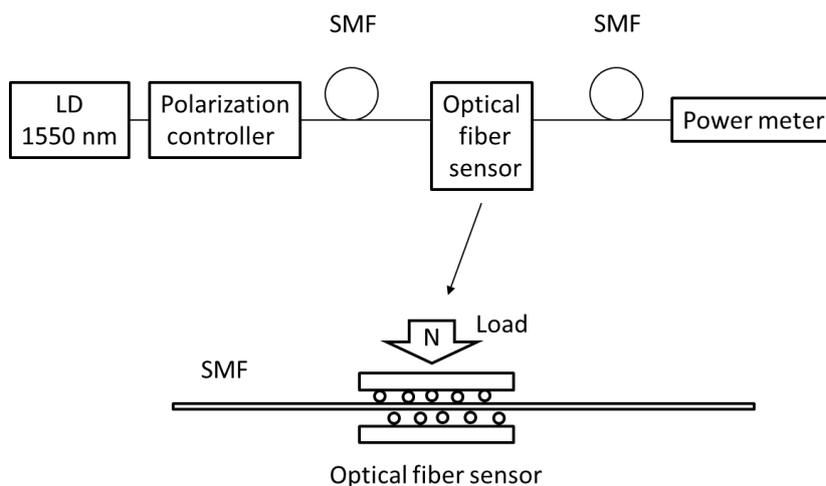


図 3.17 測定方法

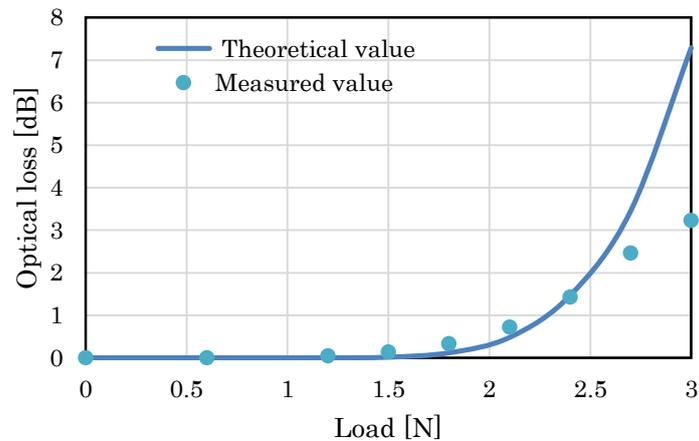


図 3.18 測定および解析値の比較

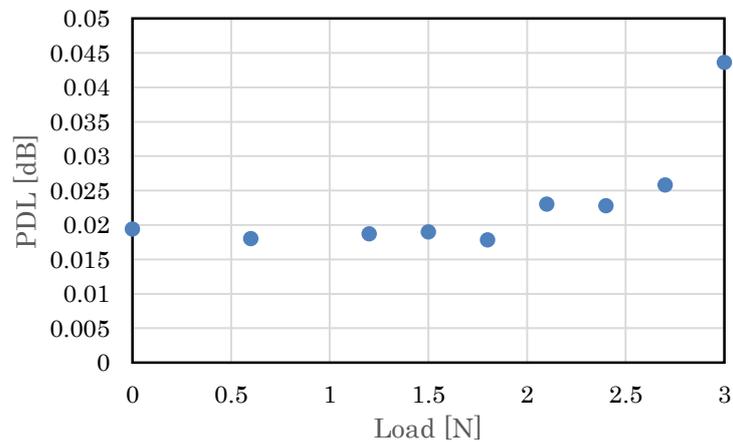


図 3.19 偏波依存損失測定結果

3.3.2 光ファイバ型ひずみセンサの荷重測定及び偏波依存損失の影響

試作した光ファイバ型ひずみセンサの荷重に対する光損失量と偏波依存性損失を調査する。設計した治具に光ファイバを接着固定する際に使用する弾性系接着剤の影響により、荷重に対する光ファイバの曲率半径の変化が 3.3.1 項に比べて小さくなる可能性があるため同様の測定を行い、有限要素解析を用いて理論値と測定値の比較を行う。このとき、接着剤の塗布量が不明であり、形状によって解析時間が大幅に増加する恐れがあるため、有限要素解析では弾性支持（弾性係数は使用した弾性接着剤と同じ数値 15 MPa）を用いて接着剤の再現を行う。また、ステンレスピンと光ファイバの接触設定は固着とした。光ファイバ型ひずみセンサの光損失の測定結果を図 3.20 に、引張・除荷時の損失変動結果を図 3.21 に、測定値と理論値の比較を図 3.22 に示す。

図 3.20 より予定した荷重を印加した状態で光ファイバ型ひずみセンサを作製したが、接着剤の影響により予定していた曲率半径より少しずれた結果となった。しかし、弾性系接着剤の効果により 10 N で 2.4 dB の光損失を得ることができ、再現性が良いこと、図 3.21 に示すようにヒステリシスが小さいことを確認した。また、測定値と理論値の比較では概ね一致していることを確認した。

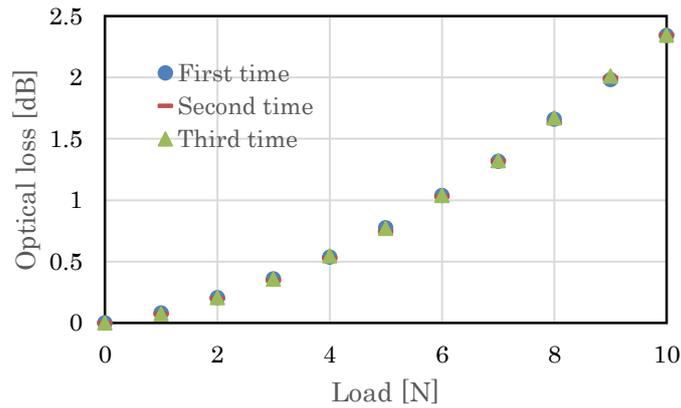


図 3.20 光損失測定結果

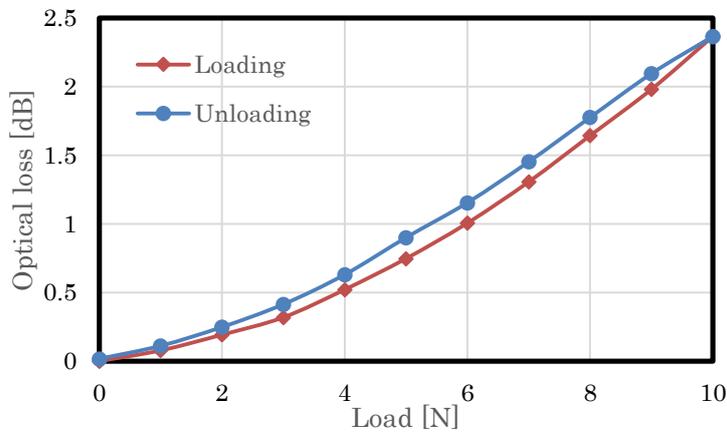


図 3.21 負荷・除荷時の損失変動測定結果

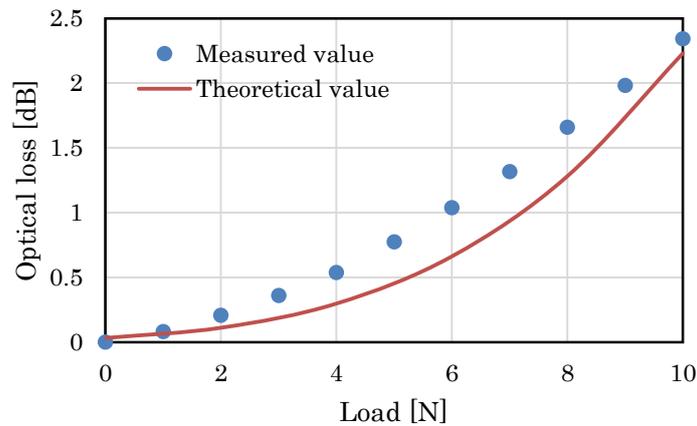


図 3.22 負荷・除荷時の損失変動測定結果

3.4 光ファイバ型ひずみセンサを用いたひずみ測定への応用

3.3 項で作製したセンサを用いてひずみセンサへの応用を試みた。試作したセンサのひずみに対する精度を測定するため厚さ 0.1 mm の金属試験片に作成したセンサをと比較対象としてひずみゲージを取り付け引張試験によるひずみ測定を行う。引張試験機で引張力を 100 N まで印加した。測定したセンサの光損失の変動とひずみゲージの値を比較し、作成したセンサを評価した。試験方法を図 3.23 に、光ファイバセンサとひずみゲージの測定結果の比較を図 3.24 に示す。

測定結果より引張力を増加するごとに光損失量が増加しているが、光変動量がかなり小さい。これは作製したセンサは測定レンジが大きくなるように設計したものであるため、ひずみ測定ではピン間隔を延長し、微小変形に対して得られる光損失量を増加したほうが良いと考えられる。

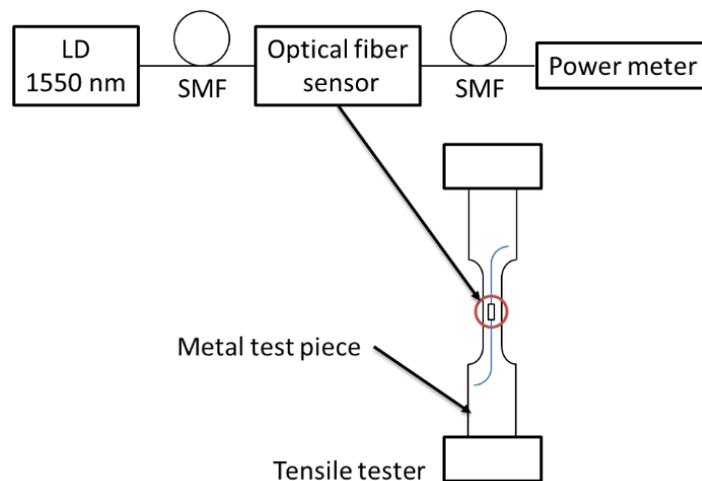


図 3.23 ひずみ測定方法

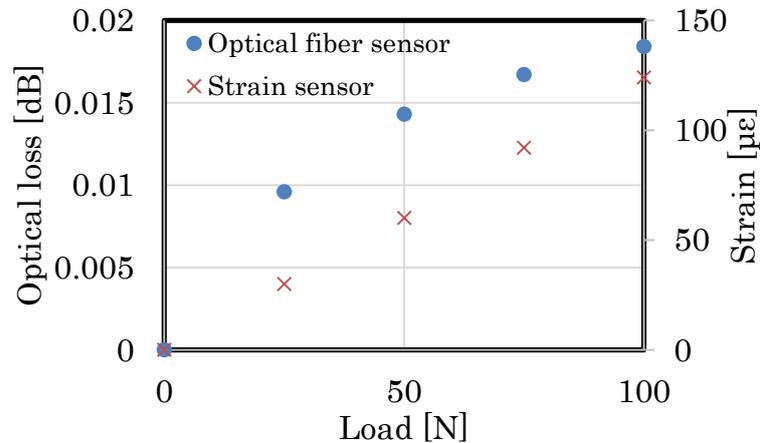


図 3.24 ひずみ測定結果

3.5 第3章のまとめ

本章では長期信頼性を重視した光ファイバ型ひずみセンサの構築を目的として、曲率半径変化による光損失変動及び、光ファイバの長期信頼性、偏波依存損失について調査を行い、最適な曲率半径を持つ光ファイバセンサを設計した後、センサ固有の初期損失、偏波依存損失を検証するとともに引張試験によるひずみ測定における光ファイバセンサの光損失について評価を行った。

まず光ファイバの長期信頼性においては立蔵氏の提案された累計破壊確率理論式より曲率半径が 3 mm の状態において累計破断確率が小さいこと、曲率半径変化における光損失変動について Marcuse の式を用いて計算を行い、B6 光ファイバを用いて曲げ損失試験 1/4 円曲げ法(JIS C 6823)による光損失の測定値とシミュレーション値の比較を行った結果、両者の変動は一致し、曲率半径 3 mm 以上であればモニタリングシステムに組み込む際の許容光損失より小さいこと、偏波依存損失においては曲げ損失試験 1/4 円曲げ法および偏波コントローラを用いて測定を行った結果、曲率半径が 3mm では偏波依存損失は大きく測定値に影響を与えることが判明し、曲率半径 5mm 以上ならば偏波依存性損失も 0.1 dB 以下に抑えられるため、複数個所に曲げを与える構造のセンサを作製した方が良いことを確認した。

次に一部の曲げを 3 点支持による梁の単純曲げと仮定し、ピン間隔と荷重に対する曲率半径の変化量を計算し、得られた曲率半径から単位長さ当たりの光損失量を求めたところ、ピン間隔が短ければ測定レンジが拡大し、長ければ測定精度が増加することを確認し、ピン間隔 3 mm、ピン本数 12 に設定した。また、光ファイバを作製した治具に接着固定を行う前に、荷重に対する光損失を測定し、有限要素解析を用いて理論値との比較を行ったところ、測定値と理論値の比較では 2.4N まで概ね一致しているが、それ以降は一致することはなかった。こ

これはクラッドに漏れた光が再びコアに伝搬したことで、再結合を起こしたことで光損失が減少したのではないかと考えられる。偏波依存損失が 3 N で急激に増加しているが 0.045 dB と小さいことから、測定値に影響を与えるのが少ないことを確認し、低荷重時の光損失の変動量が小さいと考えられ、1.8 N の荷重を印加した状態で接着剤を塗布し、光ファイバ型ひずみセンサを試作した。その結果、予定した荷重を印加した状態で光ファイバ型ひずみセンサを作製したが、接着剤の影響により予定していた曲率半径より少しずれたが、弾性系接着剤の効果により 10 N で 2.4 dB の光損失を得ることができ、再現性が良いこと、ヒステリシスが小さいことを確認した。

最後に作製したセンサを用いてひずみセンサへの応用を試みたところ、引張力を増加するごとに光損失量が増加しているが、光変動量がかなり小さい結果となった。このことから、ひずみ測定ではピン間隔を延長し、微小変形に対して得られる光損失量を増加したほうが良いと考えられる。

以上より、光ファイバ型ひずみセンサは初期損失や PDL 測定、再現性においては問題がないが、ひずみ測定に対しては改良が必要であることを確認した。

第3章の参考文献

- (1) 村山 英晶, 影山 和郎, 井川 寛隆, "FBG センサによる高空間分解能ひずみ分布計測," レーザー研究, 35 巻, Supplement 号, pp. 158-159, 2007
- (2) 高橋 淳, 野村 正人, 津田 浩, 剣持 潔, 福田 博, "曲げ損失を利用する光ファイバセンサの基礎光学特性," 日本機械学会論文集(A 編), 65 巻, 629 号, pp.106-112, 1991
- (3) 西 仁司, 正藤 慎司, 青木 政幸, 上田 正紘, 桜井 哲真, "曲率半径変化を利用した光ファイバセンサシステムにおけるグレーデッドインデックス構造の効果" レーザー研究, 33 巻, 3 号, pp. 175-180, 2005
- (4) 小倉 邦男, "通信用石英系光ファイバの製造方法," NEW GLASS, VOL.27,no.105,pp36-39,2012
- (5) The International Electrotechnical Commission ed, Optical Fibres – Reliability – Power law theory, IEC Technical Report, TR62048 Ed.2.0, (2011-5), The International Electrotechnical Commission.
- (6) Mitsunaga, Y., Katsuyama, Y., Kobayashi, H., and Ishida, Y., "Failure prediction for long length optical fiber based on proof testing," Journal of Applied Physics, vol.53, no.7, (1982-7), pp.4847-4853.
- (7) Griffioen, W., Greven, W., Jonker, J., Zandberg, S., Kuyt, G., and Overton, B., "Reliability of bend insensitive fibers," Proceedings of the 58th International Wire and Cable Symposium, (2009-11), pp.251-157
- (8) Matthijsse, P. and Griffioen, W., "Matching optical fiber lifetime and bend-loss limits for optimized local loop fiber storage," Optical Fiber Technology, vol.11, (2005-1), pp.92-99.
- (9) 立蔵 正男, 河井 昌道, "厳しい環境条件での光ファイバ曲がり部信頼性の推定法," 日本機械学会論文集(A 編), 78 巻, 794 号, pp.1485-1489, 2012
- (10) 麻生 修, 松藤 敏夫, 石川 卓也, 忠隈 昌輝, 乙須 総一郎, 八木 健, 奥 誠人, "光ファイバの機械強度に関する信頼性について : 寿命予測式に関する検討," 電子情報通信学会技術研究報告. OPE, 光エレクトロニクス 112(183), pp143-147, 2012 4)
- (11) D.Marcuse,J.Opt.Soc.Am,66-3.(1976).216-219.
- (12) JIS C 6823, "光ファイバ損失試験方法,"
- (13) 杉崎 隆一, 宮部 亮, 八木 健, "FTTH 用ファイバの開発," 古河電工時報, 116 号, 2005
- (14) 黒羽 敏明, 吉田 和昭, 西村 真雄, "ガラスファイバの通信への応用," 材料, 29 巻 327 号 pp. 1155-1163, 1980
- (15) IEC 60793-2-50:2015, "Optical fibres – Part 2-50: Product specifications –

Sectional specification for class B single-mode fibres,”

- (16) 大越孝敬 “一般偏光状態を表示するポアンカレ球と等価な平面図表—SOPダイアグラム,” OQE85-68, 電子情報通信技術研究報告
- (17) 日本機械学会,” JSME テキストシリーズ 材料力学,” 丸善, 2011
- (18) 山下宏,” 光ファイバ被覆用紫外線硬化型コーティング剤,” 熱硬化樹脂, vol.11, no. 2, pp. 48-60, 1990.

第3章に関連する学会発表および論文

- (1) 松田健太郎, 倉持亮太, 遠藤隆昭, 長瀬亮,” 光ファイバセンサを用いたマルチスケール計測とヘルスマニタリングシステムに関する研究(2) ～ 分岐光線路用損失型光ファイバセンサの設計 ～,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 186, EMD2018-20, pp. 1-4, 2018
- (2) 倉持亮太, 松田健太郎, 長瀬亮,” 光ファイバを用いたひずみセンサの試み,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 462, EMD2018-62, pp. 17-21, 2019
- (3) 倉持亮太, 松田健太郎, 長瀬亮,” 光ファイバ型ひずみセンサの偏波依存性,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 119, no. 170, EMD2019-32, pp. 71-74, 2019
- (4) 倉持亮太, 伊藤祥悟, 松田健太郎, 長瀬亮,” 光ファイバを用いたひずみセンサの試み (2) ,” vol. 120, no. 110, EMD2020-3, pp. 1-5, 2020

第4章 分岐光線路による遠隔保守監視の構築

4.1 はじめに

長寿命化計画の一環として試験運用されている光ファイバセンサの設置方式はバス型が非常に多く、光ファイバセンサを複数配置することが可能であるが、単一線路であるため光ファイバが断線すると断線発生地点以降のセンサが使用できなくなる、伝搬損失により遠方になるほど検出が困難になるなどの問題が挙げられる。断線に対して対応力のあるヘルスマonitoringを構築するのに最適な光ファイバセンサの配置方式として、ツリー型配置方式が挙げられる。断線する箇所によっては、使用可能な光ファイバセンサがバス型配置に比べて多く、1台の測定器でより広範囲に渡る測定が行える、面にセンサを配置できるので2次元的な解析状況の把握が可能である、1台でより多くの解析結果を得らえるなどの利点があることから、広範囲でのモニタリングシステムに最適であると考えられる。また、複数種のセンサを配置することで構造のモニタリングを詳細に行えることが可能である。

よって本項では OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) を用いた保守監視システムの構築を検討する。OTDR は第 1 章 1.3.2 項で述べたように、光ファイバの破断点、ファイバ端面位置の特定や、光ファイバ内の揺らぎによるレイリー後方散乱光の測定が可能である。レイリー散乱光以外にブリルアン散乱光を用いた分布測定も存在する。ブリルアン散乱を活用した分布測定は入射光パルスに対する自然散乱を時間分布測定方式 (Brillouin-OTDR : B-OTDR) や、光源側に周波数変調を用いて参照光との干渉を制御することで位置を特定する相関領域方式 (Brillouin Optical Correlation Domain Reflectometry : B-OCDR) (1)、ファイバ双方から対向伝搬させ誘導散乱を活用し、解析を行う (Brillouin Optical Time-Domain Analysis : B-OTDA) (2) などの測定手法が存在する。これらの測定方式は測定速度、分解能、測定精度が非常に優れているが、OTDR に比べて装置コストが高価であり、地方自治体で簡単に導入が難しいのではないかと考えられる。また、長期間の構造物モニタリングであれば、構造物の変化は緩やかであることから OTDR でも十分に活用することができると考えられる。しかし、OTDR は各径路の散乱光を測定することができるが各径路の終末端までの距離が同じである場合、それらの散乱光の情報が重なるため各径路の散乱光の変動を測定することは困難である。しかし、終末端までの距離を変更することで各径路の散乱光の変動を測定することや、各径路に振り分ける光量によって各径路の損失変動の調整が行うことが可能ではないかと考え、OTDR を用いた分岐光線路における遠隔保守監視システムの構築を提案する。

まず、分岐光線路における各線路の差分損失変動について、2分岐光線路の経

路ごとの損失変動や、分岐比量による各径路の損失変動の調整についてシミュレーションを行い、実際の分岐光線路を構築し各径路の損失変動の実験値と比較することで損失変動理論の妥当性を検証した。また、短経路側で得られる損失変動値は各径路の散乱光が含まれているため、実際の損失量が不明である。そこで各径路で発生する損失量の特定および、4分岐光線路において各径路の損失変動をシミュレーションで検証する。

以上の内容を本章で検討し、OTDRを用いた分岐光線路による遠隔保守監視の構築の実現を目標とした。

4.2 分岐光線路による監視システムの構築

4.2.1 レイリー散乱光測定方法について

光ファイバはプリフォームを約 2000 °C で加熱した後、線引きする際に室内温度まで急速冷却しながら巻き取るが、高温で加熱したときプリフォーム内部に密度の揺らぎが生じ、そのままの状態でも光ファイバ内に残る。この揺らぎにより発生する散乱をレイリー散乱と呼び、波長の 4 乗に反比例して大きくなるので長波長帯を用いる程その影響が少なくなる特性を有している⁽³⁾。レイリー散乱光を測定する方法はパルス光を用いた OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) がある。

OTDR は 1976 年に Barnoski 等が最初に報告し⁽²⁾、その後レイリー散乱光の公式が示され、Brinkmeyer がシングルモード光ファイバ計測への適応を示した⁽⁴⁾。OTDR の基本的構造及び測定波形を図 4.1 に示す。パルス発生器によって変調された LD から光パルスを送出し、光パルスは方向性結合器を介して測定エリアに向かう。入射した光パルスは進行とともにレイリー散乱光、フレネル反射を生じて入射側へ戻る。反射光パワーは時間分割で検出し、戻る時間より距離を計算することで距離に応じた発生する損失や反射分布、光ファイバ最終端を検出することができる。

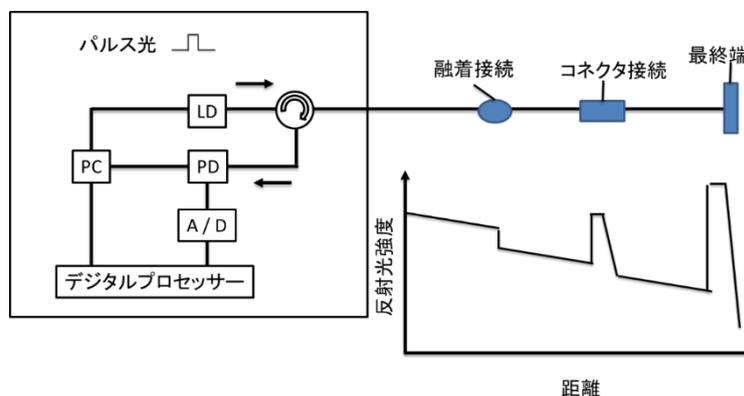


図 4.1 OTDR の基本的構造及び測定波形

OTDR は 1 章で述べたようにパルス光を入射することで、ファイバ内で発生した戻り光を時間分割して検出し、戻る時間から距離を換算することでファイバ長手方向に発生する損失や反射分布を検出する。レイリー散乱光の反射率は (4-1) 式で求めることができる⁽⁵⁾。(R_{rs}:レイリー散乱光の反射率, S:レイリー散乱光による後方に戻る光の割合, a_r:レイリー散乱光による光の損失, W:パルス半幅, v:光ファイバ内の光速)

$$R_{rs} = \frac{1}{2}(Sa_r Wv) \dots \dots \dots (4-1)$$

レイリー散乱光による戻る光の割合は (4-2) 式, w₀/a は (4-3) 式より求めることができる⁽⁶⁾。(w₀:ガウススポットサイズ, a:コア半径, V:規格化周波数, n₁:コア屈折率, n₂:クラッド屈折率)

$$S = \frac{3}{2} \frac{1}{\left(\frac{w_0}{a}\right)^2 (V)^2} \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} \dots \dots \dots (4-2)$$

$$\frac{w_0}{a} = 0.65 + 1.619V^{-1.5} + 2.879V^{-6} (4-3)$$

また、シングルモードの規格化周波数及び規格化伝搬定数 b は (4-4), (4-5) 式より定義される。

$$V = \frac{1}{\sqrt{1-b}} \left(\tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{1-b}} + \frac{\pi}{4} \right) \dots \dots \dots (4-4)$$

$$b = \frac{n_1^2 \cos^2 \theta - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} \dots \dots \dots (4-5)$$

光ファイバ内を伝搬する光は光ファイバの伝搬損失により徐々に光強度が減衰し、使用する波長によって損失量は変化する。また、融着やコネクタ接続など光ファイバの接続ではコア同士の軸ずれやファイバ引き込みによるフレネル反射により、図 4.1 のように光損失や反射減衰量の増大が発生する。

4.2.2 分岐光線路上におけるレイリー散乱光の理論式

分岐光線路において、損失変動を測定できる原理を、2 分岐系を用いて説明する。ファイバ長を異なる長さにした 2 分岐系では、OTDR は分岐したファイバの双方からの反射光を同時に受光する Area 1 と長経路側だけの反射光を受光する Area 2 の時間領域に分けて考えることができる⁽⁷⁾。損失の発生前後で OTDR の受光強度の差分(損失変動)をとると、不変箇所では損失変動は 0 になり、損失変動の立ち上がりは損失の発生箇所を示す。また、Area 1 までの損失変動であ

れば短経路側の損失，Area 2 まで及んでいれば長経路側の損失であり，損失の発生した経路が分かる。

例として，2分岐系の光線路において線路ごとに入射光の100%が戻り光になると仮定した場合，各経路の反射する光強度は(4-6)式で表すことができる。

(P：光源の光強度，C：分岐比)

$$R_n = P \times C^2 \dots\dots\dots (4-6)$$

光源の光強度を1mW，光カプラの分岐量が50:50(0.5)として，(4-6)式を用いた場合，各経路の反射光強度は0.25mW(12dB)となる。短経路側の反射光強度は長経路の反射光強度も含まれるので0.5mW(3dB)として検出する。ここで長経路側に50%の損失が発生した場合，図4.2に示すように長経路の反射光強度は0.0625mW(12dB)となり，短経路側の反射光強度は損失発生地点より前側は0.5mW(3dB)，それ以降の経路は0.3125mW(5dB)となる。損失発生前と発生後の差分を取ると短経路側では約2dB，長経路側では約6dBの損失となる。これは往復に関する理論であり，OTDRは使用者にわかりやすいように片道分の応答を表示するため，モニタ上で表記される差分損失は半分となる。この手法を計算式で表すと(4-7)式となる。(X：光損失，n：分岐数，a：経路番号)

$$L_n = -5 \log \left(\sum_{i=a}^n \left(\frac{PC_i^2}{PC_i^2 X_i^2} \right) \right) \dots\dots\dots (4-7)$$

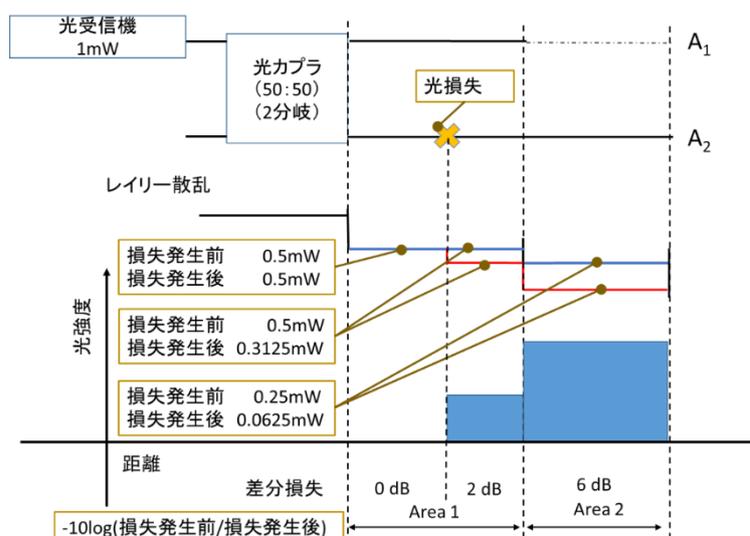


図 4.2 差分損失変動理論

4.3 差分損失変動の検証実験

4.3.1 シミュレーション及び実験による差分損失変動の検証

4.2 で述べた理論を検証するため、(4-1)～(4-5)式を用いて各経路におけるレイリー後方散乱光の損失変動の計算を行い、2分岐におけるレイリー散乱光変動の検証実験から得られた実験値と計算値の比較を行う。方法として、図4.3に示すようにOTDRと光カプラの間に60mのファイバ長を設け、短経路側32m地点(A地点)と長経路側64m地点(B地点)に3dBの固定減衰機を挿入、その後各経路に96mと128mのファイバを設けた。OTDRの応答として、計算結果と実測値を比較した結果を図4.4に示す。図4.4の右軸は損失発生前と損失発生後の差分損失量を、左軸はレイリー散乱光が100%戻り光として計算した結果をOTDRの実測値に対応させるため、規格化した光パワーとして表している。同じ損失を短経路側に与えた場合(a)と長経路側に与えた場合(b)とではOTDRの応答が異なり、計算値と実測値は一致した。接続損失前後のOTDR波形の差を取ったものを差分損失として図4.4に合わせて示す。こちらも計算値と実測値は一致した。

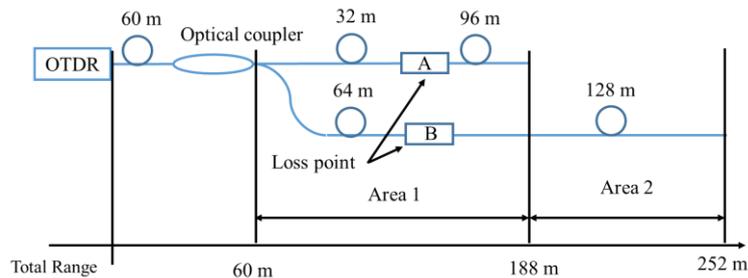
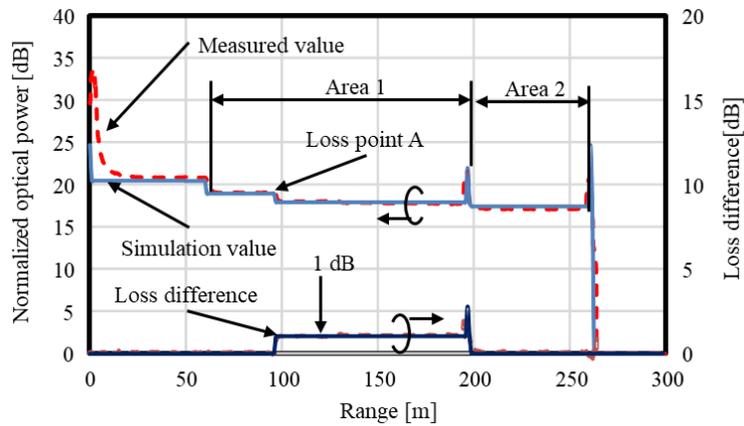
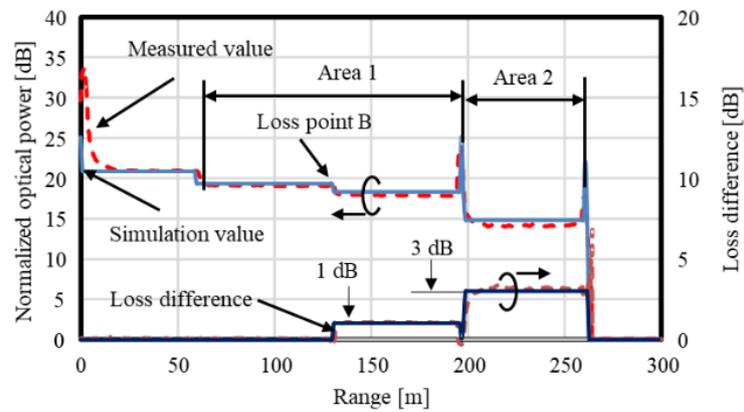


図 4.3 2分岐系測定方法



(A) 損失地点 A



(B) 損失地点 B

図 4.4 レイリー散乱光測定結果

4.3.2 差分損失変動量の調整及び検証

差分損失変動の限界値は最長経路を除いて光カプラの分岐比によって異なる。4.1 で述べたように OTDR は各経路の戻り光を総和した状態で受光波形を示している。例えば 2 分岐系でカプラの光分岐比が 50 : 50 の場合、各経路の光強度はそれぞれ 0.5 mW (-3 dBm) , 0.25 mW (-6 dBm) となり、その差分は 3 dB である。短経路側に損失が発生し、損失量が増加した場合、差分損失変動量はある地点で飽和状態となる。(4-7) 式を用いて分岐比 90 : 10 ~ 50 : 50 で短経路側に多く振り分けた状態で短経路側の差分損失変動量の計算を行った。各分岐比の計算結果を図 4.5 に示す。

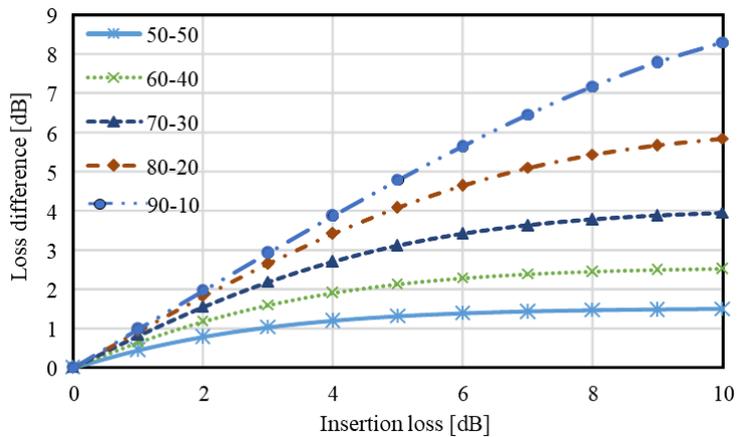


図 4.5 差分損失変動計算結果

図 4.5 より挿入損失が増加するほど差分損失の変化が減少するのが見て取れる。また、長経路と短経路の差分が大きいほど測定できる範囲が拡大し、光カプラの分岐比 90 : 10 を用いた方が差分損失の測定が容易になると考えられる。しかし、長経路側に振り分ける光強度が少なすぎると、Area 2 のレイリー散乱光がノイズ領域に入る可能性があるが、光源のパワーを大きくすることにより測定が可能になると考えられる。

分岐比を 50 : 50 と 70 : 30 を使用し、短経路側に可変減衰器 (Variable Optical Attenuator: VOA) を設置した状態で 0~5 dB まで 0.5 dB 刻みに損失を増加させた場合、差分損失値が理論値と同様に変動するのかを検証する。また、実際の光カプラの分岐比は多少の誤差があるとともに、可変減衰器の接続損失が発生するが、可変減衰器との接続損失はパワーメータ等で調べることで、光カプラを通過する前のレイリー散乱光を基準とし、Area 1 と Area 2 の差分を求めることで実際の分岐比や初期損失量を求めることができ、この分岐比と接続損失を考慮して理論値を割り出す。各分岐比のレイリー散乱光の測定系を図 4.6 に測定結果を図 4.7 に、差分損失変動の測定結果を図 4.8 に示す。図 4.7 より各分岐比の Area 1 と Area 2 の差分がそれぞれ約 1 dB (50:50) と約 3 dB (70:30) であり、各分岐比の差分損失の変動量に大きな変化が見られた。また、図 4.8 では実際の分岐比や初期損失量を考慮することで、4.2 項で述べた理論値と実測値がよく一致している。以上のことから分岐量を調整することで短経路側の測定領域や測定精度の変更により用途に合わせたモニタリングシステムの構築を行えることができると考えられる。

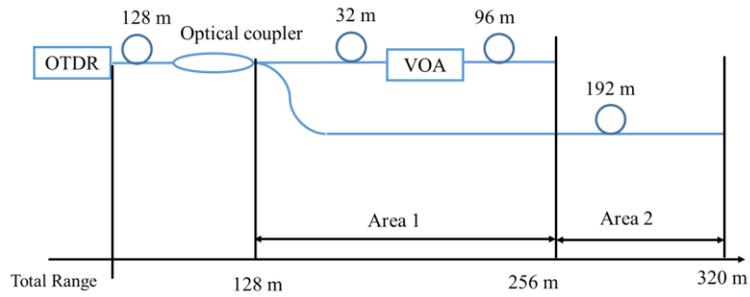
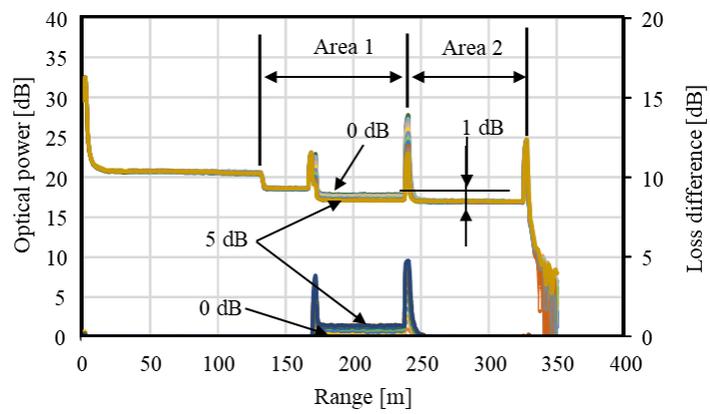
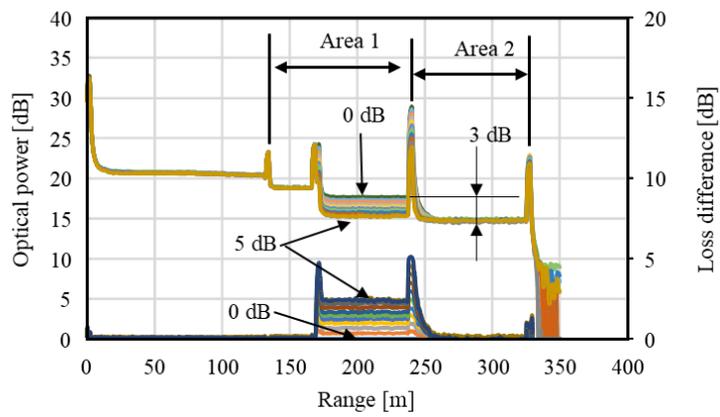


図 4.6 レイリー散乱光測定系



(A) 分岐比 50:50



(B) 分岐比 70:30

図 4.7 レイリー散乱光測定結果

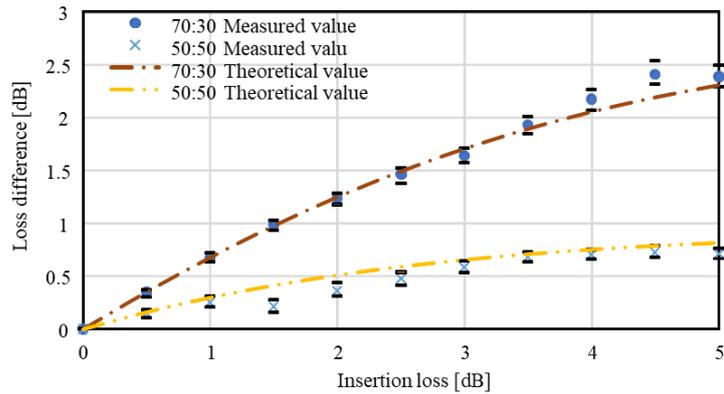


図 4.8 光損失変動量測定結果

4.4 差分損失から挿入損失の求め方

4.4.1 挿入損失の求め方

これまでの手法は挿入損失が既知である前提で計算を行っていた。しかし、実際の測定では最長経路側のみ把握することができるが短経路側では長経路側のレイリー散乱光が含まれているため、短経路側の挿入損失を把握することができない。そこで OTDR のレイリー散乱光の測定値から挿入損失を割り出す理論をここで述べる。2 分岐光線路における短経路側の損失推移を図 4.9 に示す。

短経路側に光損失が発生した場合、Area 1 の領域では光損失の発生地点前後に差が生じる。短経路側において発生地点前の領域を R_1 、発生地点後の領域を R_1' 、長経路側を R_2 とする。4.2 項で述べたように短経路側の受光強度は長経路側の受光強度に含まれているので、それぞれの受光強度を Area 2 の受光強度と差を取り、得られた両者の差分の比を取ることで短経路側に発生した光損失量を得ることができると考えられる。この理論を式で表すと (4-8) ~ (4-10) 式となる。

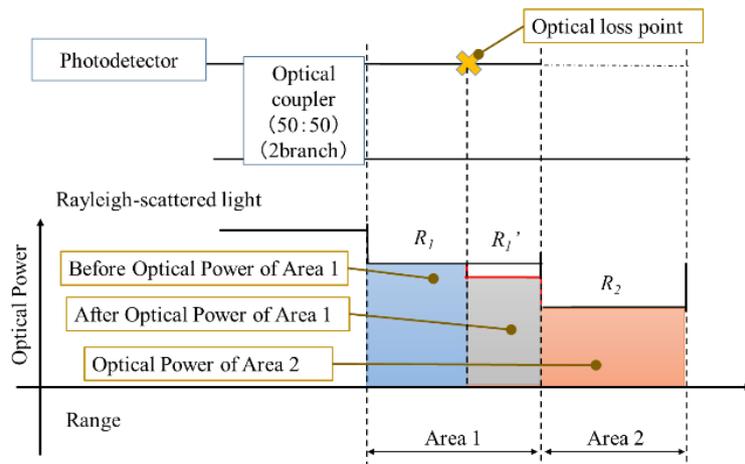


図 4.9 2 分岐光線路における短経路側の損失推移

$$I = 10^{(2R_1/10)} - 10^{(2R_2/10)} \dots\dots\dots (4-8)$$

$$F = 10^{(2R_1'/10)} - 10^{(2R_2/10)} \dots\dots\dots (4-9)$$

$$LOSS = -5 \log_{10} \left(\frac{I}{F} \right) \dots\dots\dots (4-10)$$

4.4.2 挿入損失特定理論の検証実験

分岐光線路における挿入損失を 4.4.1 で述べた計算式を用いて求められることを検証するために、OTDR シミュレーション波形や 4.3 で得た測定データを用いて挿入損失の計算を行う。可変減衰器前のレイリー散乱光を R_1 、可変減衰器後のレイリー散乱光を R_1' 、Area 2 のレイリー散乱光を R_2 として 70 : 30 の減衰量 0 dB 時の光強度を (4-8)、(4-9) 式に代入すると、 I は 4894.358、 F は 2473.986 となり、この数値の比を取ると約 1.98 となる。この数値を (4-10) 式に代入すると挿入損失は約 1.48 となる。この挿入損失は可変減衰器との接続損失量と同等である。また、70:30 の 5 dB 時では挿入損失量が約 5.1 dB となり、可変減衰器で挿入した数値と同等になった。(4-8) から (4-10) 式を用いて 2 つの分岐比の挿入損失を割り出した計算結果を図 4.10 に示す。

図 4.10 より各分岐比とも挿入損失と同等に近い計算結果を得ることができた。しかし、初期損失や接続損失、挿入損失の量によっては求めることができる損失量も変化する。4.3 項の図 4.8 でも損失量が増加するにつれ、差分損失量の変化が低下していることから一定の損失量を超えると挿入損失を求めることができるのが難しくなる。よって正確に求めることができるのは 3 dB 程度であると考えられる。

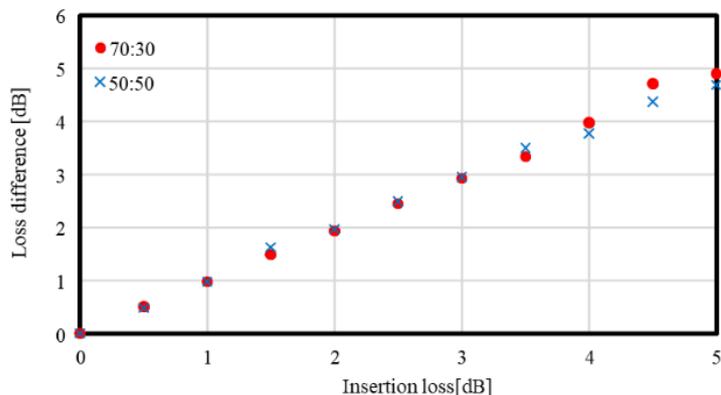


図 4.10 挿入損失計算結果

4.5 レイリー散乱光を用いた損失測定の限界

各径路の差分損失のダイナミックレンジは隣接する経路の差によって決まる。2分岐光線路の場合各径路に振り分ける光が同量でも約 3 dB の光損失までなら差分損失を測定することができる。しかし 4 分岐以上になると各径路の得られる差分損失のダイナミックレンジの差は徐々に小さくなり、差分損失や挿入損失の特定が困難になると考えられる。そこで 4 分岐光線路の各径路の差分損失変動の応答波形シミュレーションプログラムを作成し、最長経路を除いた各径路の損失変動計算を行う。シミュレーションによる 4 分岐光線路の測定系を図 4.11 に、シミュレーション波形を図 4.12 に、各径路の差分損失変動を図 4.13 に示す。

図 4.12 より各径路の光強度の差分量は短経路側から約 0.6 dB, 0.8 dB, 1.5 dB であり短経路になるにつれ差分量は小さくなった。また、図 4.13 より得られる各径路の差分損失量も同様に最短経路になるにつれ減少している。実際の測定系では初期損失やノイズなどが含まれているので、得られる差分損失量は図 4.12 より少ないと考えられる。また、得られる差分損失が少なすぎると (4-8) ~ (4-10) 式を用いたとしても挿入損失の特定は困難になると考えられる。分岐する光を短経路側に多く割り振れば差分損失量の変動値も上昇するが、それでも各径路の差分は 1.5 dB 程度である。このことからレイリー散乱光を用いた分岐光線路の測定限界は 4 あるいは 5 分岐程度であると考えられる。

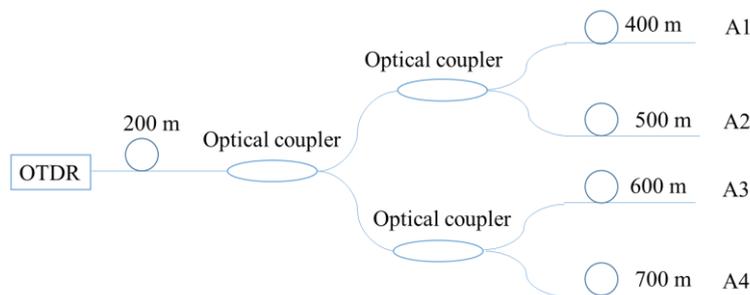


図 4.11 4 分岐光線路

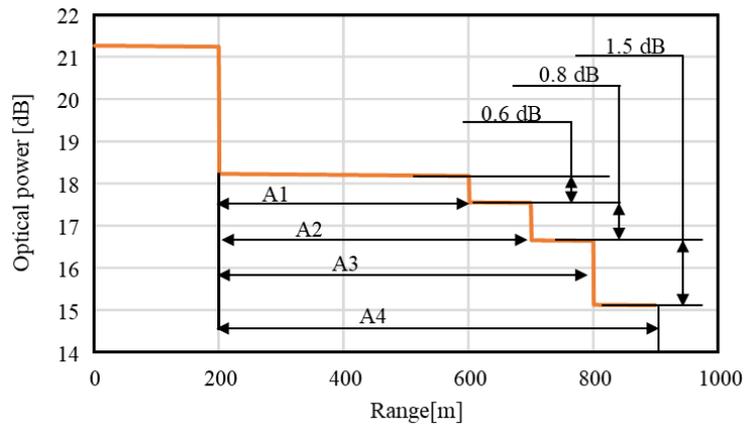


図 4.12 レイリー散乱光の応答波形

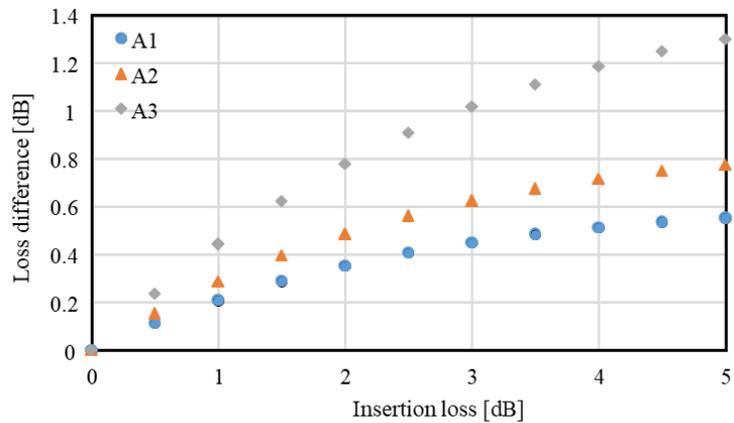


図 4.13 光損失変動計算結果

4.6 光ファイバ型ひずみセンサ，BOF センサを用いた同時測定の実現

光ファイバ型防ひずみセンサ，BOF センサを用いた分岐光線路測定系を図 4.14 に位相型 OTDR の受振波形による振動測定方法を図 4.15 に示す．光ファイバ型ひずみセンサ，BOF センサを用いて分岐光線路によるひずみ，振動検知は，位相型 OTDR の測定手法を参考にし，図 4.14 のような測定系を構成することにより測定が行えると考えられる．位相型 OTDR は光ファイバの屈折率変化による位相の変化と干渉を用いた測定手法である．位相変化のない区間では同一のレイリー散乱光が干渉するため反射光強度の変化はないが，振動などの影響がある区間では位相変化のない区間とある区間では干渉が異なり反射光強度が変化する．その変化の周波数と反射光の時間を測定することで振動点の距離と周波数を特定することができる．この時，サンプリング周波数を測定振動数の数十倍以上に，パルス光周期を最小に設定し，振動点のポイントを連続して測定を行う

ことにより図 4.15 のように振動周波数を確認することができる。

位相型 OTDR では振動点の位置を検索しなければならないが、BOF センサでは、フレネル反射によりレイリー散乱光より高い反射光強度で入力されるため、BOF センサの位置を特定するのは容易であり、ノイズの影響を受けることが少ないので振動周波数を確認することができると考えられる。

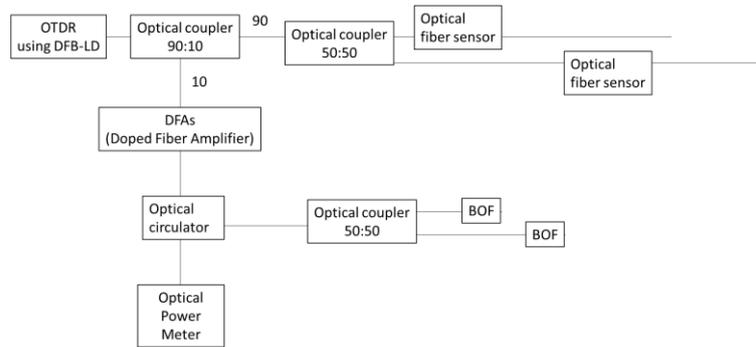


図 4.14 光ファイバ型防災センサ，BOF センサを用いた分岐光線路測定系の展望

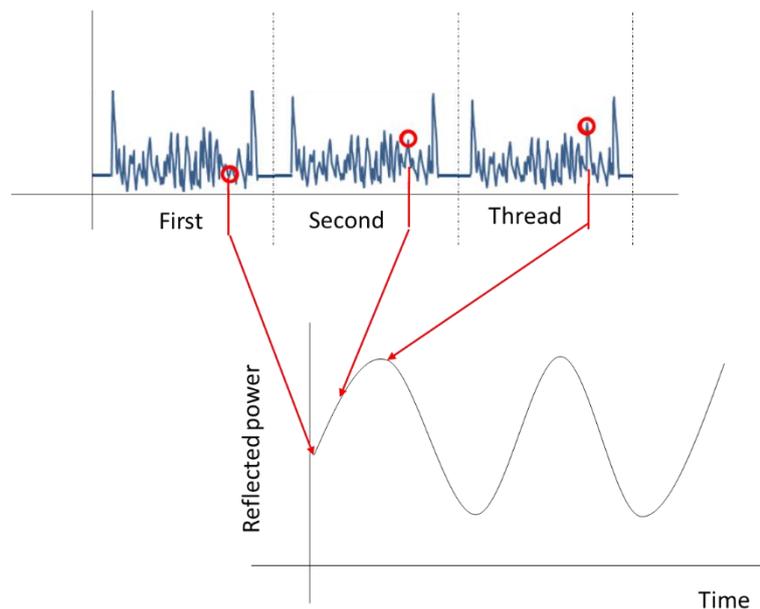


図 4.15 位相型 OTDR の受振波形による振動測定方法

4.7 第4章のまとめ

本研究では OTDR と分岐光線路を用いて防災用常時モニタリングシステムの構築を目的として各径路の損失発生時に得られる光損失量や光の分岐比率による各径路の分解能について理論を述べ、実際に構築した分岐光線路の実験値の比較を行うとともに、OTDR から得られた数値より挿入した光損失量の特定する手法を検討した。

最初に、OTDR を用いた各経路の差分損失変動の理論を検証するため、各経路におけるレイリー後方散乱光の損失変動の計算を行い、2分岐におけるレイリー散乱光変動の検証実験から得られた実験値と計算値の比較を行った結果、両者の OTDR の応答が異なること、計算値と実測値は一致したことを確認した。

次に、差分損失変動の限界値は最長経路を除いて光カプラの分岐比によって異なるので分岐比 90 : 10 ~ 50 : 50 で短経路側に多く振り分けた状態で短経路側の差分損失変動量の計算を行った結果、挿入損失が増加するほど差分損失の変化が減少するのが見て取れる。

また、長経路と短経路の差分が大きいほど測定できる範囲が拡大し、光カプラの分岐比 90 : 10 を用いた方が差分損失の測定が容易になると考えられる。しかし、長経路側に振り分ける光強度が少なすぎると、Area 2 のレイリー散乱光がノイズ領域に入る可能性があるが、光源のパワーを大きくすることにより測定が可能になると考えられる。また、分岐比を 50 : 50 と 70 : 30 を使用し、短経路側に VOA を設置し、0 ~ 5 dB まで 0.5 dB 刻みに損失を増加させ、差分損失値が理論値と同様に変動するのかを検証した結果、各分岐比の差分損失の変動量に大きな変化が見られ、実際の分岐比や初期損失量を考慮することで、理論値と実測値がよく一致していることを確認した。このことから分岐量を調整することで短経路側の測定領域や測定精度の変更により用途に合わせたモニタリングシステムの構築を行えることができると考えられる。

次に、短経路側の挿入損失を割り出す理論を検証するため、OTDR シミュレーション波形や分岐比 50 : 50 と 70 : 30 の測定結果を用いて挿入損失の計算を行った結果、挿入損失に近い数値を得ることができたが、初期損失量や差分損失の変動によっては計算による誤差が大きくなるため、必要な分解能に応じた設計が可能になることを示した。

次に、各径路の差分損失のダイナミックレンジは隣接する経路の差によって決まることから、4分岐光線路の各径路の差分損失変動の応答波形の損失変動計算を行った結果、各径路の光強度の差分量は短経路側から約 0.6 dB, 0.8 dB, 1.5 dB であり短経路になるにつれ差分量は小さくなり、各径路の差分損失量も同様に最短経路になるにつれ減少した。このことから得られる差分損失が少なすぎると理論式を用いたとしても挿入損失の特定は困難になると考えられる。また、

分岐する光を短経路側に多く割り振れば差分損失量の変動値も上昇するが、それでも各径路の差分は 1.5 dB 程度であることからレイリー散乱光を用いた分岐光線路の測定限界は 4 あるいは 5 分岐程度であると考えられる。

最後に、2 章 (BOF センサ) , 3 章 (光ファイバ型ひずみセンサ) で述べた光ファイバセンサを同時に使用する手法として、コヒーレンス長が長い光源を用いた位相型 OTDR によるひずみ、振動測定について述べた。本来の位相型 OTDR による振動測定は振動地点で発生するレイリー散乱光の干渉による光強度変化を連続測定することで振動発生地点、周波数等を測定するが、レイリー散乱光は反射光強度が低いためノイズに埋もれやすい。一方、BOF センサを用いた場合、振動発生地点の特定がしやすく、BOF センサで発生するフレネル反射はレイリー散乱光より反射光強度が高いことからノイズに埋もれることはないので振動測定は容易であると考えられる。

以上のことから OTDR と分岐光線路を用いて、各径路上の損失変動検出および挿入損失の特定は可能であることから、安価に防災用常時モニタリングシステムを構築できることが期待される。

第4章の参考文献

- (1) 水野洋輔, “片端光入射によるリアルタイム分布型光ファイバーセンサーの開発,” TELECOM FRONTIER, no.94, pp1-6, (2017)
- (2) 西尾真由子, 水野圭太, 勝地弘, 山田均, “分布型光ファイバセンサを用いた橋梁支承モニタリングに関する基礎検討,” 構造工学論文集 A, vol.60A, pp484-492, (2016)
- (3) 左貝潤一, “光ファイバの伝搬損失理論(上),” レーザー研究会, vol.7, no.3, pp.26-38, 1979.
- (4) M. K. Barnoski and S. M. Jensen, “Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics,” Appl. Opt. vol.15, no.9, pp.2112-2115, sep.1976.
- (5) E.Brinkmeyer, “Backscattering in Single-mode Fibers,” Elect Lett. vol.16, no.9, pp.329-330, 1980.
- (6) D. Marcuse, “Loss analysis of single-mode fiber splices,” Bell Syst. Tech. J., vol. 56, no. 5, pp703-718, 1977
- (7) 遠藤隆昭, 長瀬亮, “分岐光線路における損失変動検出方法の研究(6),” 電気通信学会技術報告, vol.116, no.194, pp71-75, (2016)

第4章に関連する学会発表および論文

- (1) Kentaro Matsuda, Ryota Kuramochi, Takaaki Endo, Ryo Nagase, “Study on Loss Variation Measurement of Branched Fibers,” IEEE CPMT Symposium Japan 2019, 42, nov, 2019
- (2) 松田健太郎, 遠藤隆昭, 長瀬亮, “分岐光線路における損失変動検出方法に関する研究,” 電気学会論文誌 E, vol.140, no.8, pp214-220, 2020.

第5章 結論

本論文は光ファイバセンサを用いて法範囲における保守監視において、後方レイリー散乱光を対象にした分岐光線路によるモニタリングシステムを提案し、構造物の状態、経年劣化またはイベントによる信号放出を対象にした光ファイバ型ひずみゲージの設計、BOF センサの信号取得について検証し、まとめたものである。

まず第2章では探傷技術として材料から発する弾性波 (Acoustic Emission : AE) をとらえる手法を取り上げた。AE とは材料が変形、き裂などが発生すると、材料内部に蓄積された歪みエネルギーが解放され、弾性波として放出され材料内を伝搬する現象である。誘電体多層膜を装着した光ファイバセンサ (Bandpass filter On Fiber-end : BOF) を用いて AE 波を測定するにあたって、AE 波は数十 kHz 以上の周波数を発することが報告されていることから従来のピエゾ式 AE 波センサを用いた接触法による BOF センサの広帯域における周波数特性の調査を行った。また、材料評価として最も基本的な試験である三点曲げ破壊試験 (JIS A 1106 及び JIS K 7074) を用いてコンクリートと炭素繊維複合材の破壊による AE の検出を行い、AE に対する BOF センサの評価を行った。まず BOF センサの周波数特性は 1000 kHz まで検出することが可能であり、両者が発するであろう AE 波の周波数を捉えきえることを確認した。次に炭素繊維複合材の3点曲げ破壊試験による AE 波検出ではそれぞれが発する AE を捉えていた。また炭素繊維複合材では破壊モードによって異なる周波数を発することが報告されていることから、静的な面外負荷及び単一モードの破壊による AE 検出を行った結果、それぞれが発する AE を捉えていた。落錘衝撃による AE 検出は約 50 kHz, 約 60 kHz, 約 200 kHz の波形が検出され、これらの周波数は炭素繊維複合材が樹脂割れ及び層間剥離を起こした際に発する AE 波であることを確認した。最後に水中養生期間を2週間、水セメント比を 0.5 に設定したコンクリート試験片を作製し、JIS A 1106 に規定されたコンクリート曲げ強度試験による破壊試験での各試験片の AE 波測定を試みたところ、コンクリート試験片では同じタイミングで AE 波の検出、鉄筋入りコンクリートではひび割れ、破損時の AE 波の検出を確認した。以上のことから BOF センサを用いて構造物の破壊における AE 検出が可能であることを確認した。

第3章では光ファイバ型ひずみセンサの構造設計として、曲げによる光損失を用いた光ファイバセンサの作製を検討した。光ファイバ型ひずみセンサを作製するにあたって、光ファイバの曲げ損失と機械的信頼性、および曲げによる偏波依存性損失の観点から、最適な初期光損失量と感度が得られる曲率半径を検討した結果、ピン間隔 3 mm, ピン本数 12 に設定した。また、光ファイバを作製

した治具に接着固定を行う前に、荷重に対する光損失を測定し、有限要素解析を用いて理論値との比較を行ったところ、測定値と理論値の比較では 2.4 N まで概ね一致しているが、それ以降は一致することはなかった。これはクラッドに漏れた光が再びコアに再結合を起こしたことで光損失が減少したのではないかと考えられる。偏波依存損失が 3 N で急激に増加しているが 0.045 dB と小さいことから、測定値に影響を与えるのが少ないことを確認し、低荷重時の光損失の変動量が小さいと考えられ、1.8 N の荷重を印加した状態で接着剤を塗布し、光ファイバ型ひずみセンサを試作した。その結果、予定した荷重を印加した状態で光ファイバ型ひずみセンサを作製したが、接着剤の影響により予定していた曲率半径より少しずれたものの、弾性系接着剤の効果により 10 N で 2.4 dB の光損失を得ることができ、再現性が良いこと、ヒステリシスが小さいことを確認した。最後に作製したセンサを用いてひずみセンサへの応用を試みたところ、引張力を増加するごとに光損失量が増加しているが、光変動量がかなり小さい結果となった。このことから、ひずみ測定ではピン間隔を延長し、微小変形に対して得られる光損失量を増加したほうが良いと考えられる。

以上より、光ファイバ型ひずみセンサは初期損失や PDL 測定、再現性においては問題がないことから、モニタリングシステムに組み込みができることを示した。

第 4 章では OTDR を用いた分岐光線路による遠隔保守監視の構築の実現を目指した。本研究で考案した OTDR を用いた分岐光線路における各線路の差分損失変動について、2 分岐光線路の経路ごとの損失変動や、分岐比量による各径路の損失変動の調整についてシミュレーションを行い、実際の分岐光線路を構築し各径路の損失変動の実験値と比較することで損失変動理論の妥当性を検証した。また、短経路側で得られる損失変動値は各経路の散乱光が含まれているため、実際の損失量が不明である。そこで各経路で発生する損失量の特定および、4 分岐光線路において各経路の損失変動をシミュレーションで検証した。その結果、2 分岐光線路の経路において各経路の挿入損失に対しての差分損失変動の理論値と実測値が一致した。また、初期損失量や差分損失の変動によっては計算による誤差が大きくなるため、分岐比率による短経路側の最大損失変動量を調査し、短経路側に分岐量を増加させることで測定レンジの拡大が行えることから、必要な分解能に応じて分岐比に対する最適な設計を行う手法を見出した。

以上述べた通り、本論文では誘電体多層膜フィルタを装着した BOF センサによる AE 計測、光ファイバ型防災用センサの提案と構造設計、および光ファイバ線路の保守点検用に用いられている安価な OTDR と分岐光線路を用い、低コストに多点分布測定が可能な常時モニタリングシステムの提案を行い、基本性能を確認した。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、千葉工業大学大学院工学研究科・長瀬亮教授には、約 10 年という長い時間、覚えの悪い私に対して根気強く光ファイバに関する様々な知識、技術をご教授いただきました。学部の研究室配属時に快く受け入れてくださりましたこと、博士前期課程及び後期課程の進学のお機会を与えてくださりましたことを深く感謝致します。また、これまで執筆してきた論文の添削や研究内容など、多岐にわたってご指導を賜りました。多種多様な失敗をする私に対して、懇切丁寧なご指導をいただき、適切な方向へと導いてくださいました。先生のご指導の下、研究者としてだけでなく、一人の人間としても大きく成長できたものと思っております。また、博士号を取得できたことを大変嬉しく、誇りに思います。本当にありがとうございました。

論文審査に貴重なお時間をさいて頂いた、千葉工業大学大学院工学研究科、徳永剛准教授、松井伸介教授、秋田剛准教授、慶応義塾大学理工学部物理情報工学科、石樽崇明教授に感謝申し上げます。本論文をまとめられたのは、皆様に詳細に審査して頂いたことや、貴重なご意見とご指導を頂いたおかげであります。ここに深く感謝いたします。

元株式会社渡辺製作所の斧田誠一様、小松康俊様（現：光ファイバセンシング振興協会）、井上恵一様（現：JMACS 株式会社）には、BOF センサや測定装置のご提供及び研究に関する考察に対して多くのご助言を頂きました。小松様には BOF センサの構成に関する貴重なご意見やご指摘を、井上様には測定装置のプログラム編集に関する貴重なご意見やご指摘を頂きました。皆様がいらっしゃらなければ、本論文の第 2 章は存在しませんでした。この場を借りて感謝申し上げます。

株式会社日本電気硝子の中島外博様、小松耕哉様には、FIX スタブの特注、薄膜蒸着のご提供や BOF センサに関する研究内容について多くのご助言を頂き、大変参考になりました。この場を借りて感謝申し上げます。

千葉工業大学工学部機械電子創成工学科・手嶋吉法教授、同・菅洋志准教授、千葉工業大学工学部機械工学科・熱海武憲教授、同・原祥太郎准教授、元千葉工業大学工学部機械工学学科・大谷親助教には TA 業務だけでなく、日々の研究生活や学会論文誌において気にかけてくださいました。心より感謝申し上げます。

実験、研究生活全般に渡ってご支援いただきました長瀬研究室の倉持亮太君、高橋遼君、今泉可津貴君をはじめとする研究室の皆様、境目賢義様、栗林薫様をはじめとする長瀬研 OB・OG の皆様に感謝申し上げます。研究に行き詰った時は皆様に励ましていただくと共に、大変楽しい時間を過ごすことが出来ました。

また、本論文2章から4章の内容は卒業生である荒井健太様、末永克樹様、遠藤隆昭様が基礎研究および実験を行ってくれたことで成り立ったものであります。厚く感謝致します。

本論文をまとめるにあたり、様々な方々からご指導、ご配慮を頂きました。関わって頂いた全ての皆様に深く感謝します。

最後に、長い学生生活を支えてくださいました両親に深く深く感謝致します。私が博士号を取得できたのは、ひとえに家族の支援があったらからです。本当にありがとうございました。

令和3年2月