

FBG光ファイバセンシングによる 回転軸モニタリングに関する研究

2016年3月

佐賀大学大学院工学系研究科
システム創成科学専攻

葉山 裕

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究背景.....	2
1.1.1 構造健全性モニタリング.....	2
1.1.2 光ファイバセンシングの高機能性.....	2
1.1.3 回転軸モニタリングを必要とする分野.....	4
1.1.4 回転軸モニタリングの現状と課題	6
1.2 本研究の目的と概要	7
1.2.1 本研究の目的	7
1.2.2 本論文の構成	10
参考文献	12
第 2 章 回転軸モニタリングの基礎.....	14
2.1 回転軸モニタリングシステムの構成.....	15
2.2 FBG 方式光ファイバセンシング.....	16
2.2.1 FBG センシングの原理.....	16
2.2.2 FBG センサの感度.....	17
2.2.3 FBG センサと固定方法.....	18
参考文献	21

第 3 章 FBG センシングによる回転軸の空間光伝送性能評価	22
3.1 緒言	23
3.2 間欠的な空間光伝送の原理と性能評価指標	24
3.2.1 間欠的な空間光伝送の原理	24
3.2.2 間欠的な空間光伝送性能の評価指標	27
3.2.3 光学的特性起因の波長シフト	28
3.3 光学的空間伝送の性能評価	31
3.3.1 光学的空間伝送装置	31
3.3.2 回転試験	35
3.4 結言	42
参考文献	43

第 4 章 FBG センシングによる円筒表面のねじりひずみ分布計測	44
4.1 緒言	45
4.2 基礎試験	46
4.2.1 単軸引張試験	46
4.2.2 曲率の波長への影響確認試験	48
4.3 ねじり負荷試験	50
4.3.1 試験装置	50
4.3.2 試験結果	54
4.4 FEM 解析	59
4.4.1 FEM 解析モデル	59

4.4.2	軸方向のひずみ分布(FEM 解析と試験結果の比較).....	60
4.5	考察	61
4.5.1	計測精度の評価.....	61
4.5.2	FBG センシングの対センサによる精度向上.....	62
4.5.3	曲率起因の波長シフト.....	62
4.6	結言	63
	参考文献	64
第 5 章	FBG センシングによる回転軸表面のねじりひずみ分布計測	65
5.1	緒言	66
5.2	静止ねじり負荷試験	67
5.2.1	試験装置.....	67
5.2.2	温度測定.....	71
5.2.3	静止ねじり負荷試験結果	72
5.3	回転試験装置によるねじり負荷試験.....	74
5.3.1	回転試験装置	74
5.3.2	回転無負荷試験.....	77
5.3.3	回転ねじり負荷試験.....	81
5.4	考察	85
5.4.1	ひずみ測定精度の評価.....	85
5.4.2	空間光伝送性能の評価	87
5.5	結言	89

参考文献	90
第 6 章 結論	91
6.1 結言	91
6.2 回転軸モニタリングの今後の展開	97
6.2.1 船舶用軸馬力計測システム	97
6.2.2 多目的な回転軸モニタリングシステム	99
謝辞	101

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 構造健全性モニタリング

橋梁・トンネル・高速道路等社会的なインフラ構造物の老朽化の進展により、長期間使用が期待される構造物の耐久性評価や保証する仕組みとして構造健全性モニタリング

(Structural Health Monitoring) が強く求められている。構造健全性モニタリングは、時間軸上で構造物の健全性を監視することで、従来から行われている一連の健全性確認行為を自動化し、効率化・省力化を図ろうとするものである。そうした仕組みにより、構造システムの安全性・信頼性を確保し、設計・製造からメンテナンス、修理、廃棄までのライフサイクルコストの低減が可能になる。構造健全性モニタリングを構成する技術⁽¹⁾としては、構造物の挙動を測定するセンシング技術、構造物から管理箇所までデータ伝送および大量データの管理技術、計測データに基づく健全度評価診断技術などがあげられる。

一方、従来の設備保全は、損傷が発生した後に対処する事後的管理や一定の時間毎に設備の更新や目視中心の検査を行う時間基準の維持管理といえる。そのため、圧倒的なばらつきを持つ実態から推計や予測の限界、外観には現れない内部欠陥や損傷といった致命的事象の見逃しといった目視検査の限界、不可避的な突発的事象の見逃しといった間欠的検査の限界などがあると指摘⁽²⁾されている。つまり経時的・数値的把握の困難さという技術的把握面に構造物維持管理の課題がみられる。

1.1.2 光ファイバセンシングの高機能性

従来の設備維持管理課題の解決のために高性能センシングが必要であり、遠隔地からの常時監視を可能にする技術として、次の利点から光ファイバセンシングが期待⁽³⁾されている。

- ・ 小型で埋め込み可能。
- ・ 多点での計測が可能。
- ・ 数十 km オーダーの長距離伝送が可能。

- ・ 電磁誘導をうけないので、ノイズが少ない。
- ・ 敷設が容易で、耐久性に優れる。
- ・ 既設光ケーブルを伝送路として利用可能。
- ・ 電源が不要で、完全防爆である。

光ファイバセンシングが構造健全性モニタリングに適用⁽⁴⁾され、必須なものになっている例として大型民間航空機の機体ひずみ分布計測がある⁽⁵⁾。大型民間航空機には早くから構造健全性モニタリングが導入され、定期点検を排除して常時モニタリングすることで、メンテナンスコストが大幅に削減された。さらに、定期点検の場合にその谷間で発生し見逃す異常を、見逃すことがないため安全性向上にも役立つとされている。特に、最近の大型民間航空機では、軽量化のため CFRP 複合材を始め先進複合材料化が進み、機体重量の 50%以上を占めるといわれている。そうした先進軽量複合材が、機体の一次構造材に使用される場合には、構造システムの安全性・信頼性を確保し、メンテナンスを含めてライフサイクルコストの低減には構造健全性モニタリングが不可欠となっている。

光ファイバセンシングは BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectmeter), ROTDR (Raman Optical Time Domain Reflectmeter)の分布型センサや FBG (Fiber Bragg Grating) の多点型センサなどに区分される⁽⁶⁾。光ファイバセンシングの種類と特徴を表 1.1 にまとめて示す。

Table 1.1 Types and characteristics of optical fiber sensing

Classification	Type	Measurement accuracy			Responsiveness	Cost
		Temp.	Strain	Others		
ROTDR	Distibuted	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	—	—	A few seconds to a few minutes	Relatively inexpensive
BOTDR	Distibuted	$\pm 1.0^{\circ}\text{C}$	$\pm 100\mu\epsilon$	—	Few minutes to several minutes	High price
FBG	Multi-point	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$	$\pm 1.0\mu\epsilon$	Vibration	Instant	Relatively inexpensive

この中で、FBG 方式センシングは、応答性や測定精度、多用途性及びシステム価格などが優れ、FBG センサの張線角度、施工法及びセンサ種別を選択することでひずみ、振動、温度などの物理量に関する多目的なモニタリングシステムの構築が可能である⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

また、FBG によるひずみ計測は、1 ラインに複数の FBG センサを直列につなぎ各ブラッグ波長の区別を行うことにより、多点計測することが可能である。FBG センサに使用される波長域は、光ファイバにおける伝送損失が最小となる C-Band 帯 1530~1565 nm で 1550 nm がその中心波長として扱われる。光源の波長変動域 35~80 nm 内で波長が重ならないよう各 FBG センサ間で 5 nm 程度波長間隔をとる場合、一本のファイバで 7~16 点のひずみ計測が行える。こうした多点計測機能を活用して、1 ラインでひずみや温度など多目的に、同時かつ容易に（準）分布計測することができる。

1.1.3 回転軸モニタリングを必要とする分野

再生可能エネルギーとして洋上風力発電への期待は高い。ただし、洋上風車は地上風車と比べ大型化し、風力発電機へのアクセスも困難となる。そのため、洋上風車で一番重要なのは、信頼性の問題である。天候が悪い場合には洋上に行き難いので、まずは信頼性の高い設備が必要であるが、回転軸に固有の軸受けや歯車の異常発見が遅れると、故障が全体に広がる恐れがでてくる。ブレード（風車の羽根）や主軸などの状態を遠隔地から常時監視でき、かつ監視するだけでなく故障予知や診断も実施するようなシステムが期待されている所以である⁽¹⁰⁾。

洋上風力発電における設備利用率について、風力先進地域ヨーロッパの例として 2012 年のレポート⁽¹¹⁾で、洋上風力の方が地上風力に比べ初期の設備利用率は高いが経年劣化が激しいと次のように紹介されている。

洋上風力 40%（1 年目）→ 15%（10 年目）

地上風力 24%（1年目）→ 15%（10年目）

また、風力発電の年間設備利用率では、採算分岐点は少なくとも22%、一般的には25%以上といわれている⁽¹²⁾。そのため、洋上風力発電では厳しい操業環境のもと長期にわたる設備利用率の維持が課題であり、メンテナンス性改善を目的とした回転軸モニタリングのニーズは洋上風力の方が地上風力に比べて大きいと考えられる。

一方、EEDI（Energy Efficiency Design Index：エネルギー効率設計指標）やEEOI（Energy Efficiency Operational Indicator：エネルギー効率運航指標）等の国際海運におけるエネルギー規制⁽¹³⁾や、燃費改善の観点から船舶の省エネ運航の意識の高まりをうけて、船舶の正確な馬力計測のニーズが強く存在⁽¹⁴⁾している。EEDIは新たに建造する船舶に対する設計基準で、これに合致しているかどうかは試運転時に計測確認を行う。その場合に、最も重要なことは軸馬力値の精度の高い計測が要求され、取り付けや取り外しが簡単な装置が望まれていることである。またEEOIは航海データの収集解析が必要とされるので、長期間安定した計測が可能な装置が望まれている。

燃料消費は出力（馬力）に比例し、出力（馬力）は速力の3乗に比例⁽¹⁵⁾する。このことから船舶の省エネルギー化のための出力削減については、最適航路の選択や最適船速（定時性を維持した沖待ち時間利用の減速運航）で20%以上の省エネ効果がある⁽¹⁶⁾とされている。最適船速計画には正確な出力—速力のパワーカーブが必要となるので、そのために正確な軸馬力計のニーズが強い。しかし、軸馬力計測は、ねじりにより回転軸に発生するひずみを測定し、回転軸から多点の測定データを系外へ伝送する必要があるため、一般的には容易ではない。

1.1.4 回転軸モニタリングの現状と課題

光ファイバセンサ方式の回転軸モニタリングにおいて、従来方法は、回転軸中心でのロータリコネクタの使用や無線方式による測定データの系外取り出しが主流である⁽¹⁷⁾。風力発電設備での光ファイバセンシングの利用例をみると、ブレードのひずみ分布測定で強度評価やピッチ角制御用に標準装備化が進んでいるようで、測定データの系外取り出しには前述の方法がとられている⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。

しかし、ロータリコネクタ方式の場合には、軸加工が必要でコスト高となる。また、無線方式の場合には、無線固有の伝送特性(騒音などの外乱に弱い)や回転軸に取付ける機器重量(計測器本体、バッテリー)などの問題がある。そうした理由から、回転軸モニタリングには電気式センサと無線による系外伝送の組合せが多い。

一方、現在市販されている船舶用軸馬力計では、回転軸からの測定データの伝送に無線を用いる例が多くみられ、センサとして光学式⁽²⁰⁾、ストレインゲージ式、アモルファス合金式等が提案されている。課題としては、無線方式の前述と同じ課題やセンサの測定精度、外航船への常備や内航船までの普及を考えた場合のシステム価格などがあげられる。船舶用軸馬力計では、光ファイバセンシングを測定方式としている例はみられない。その理由は、系外への測定データの取り出しの難しさにあると推定される。

1.2 本研究の目的と概要

1.2.1 本研究の目的

本論文では、1.1 で述べた研究背景のもとで、回転軸モニタリングに関する課題解決するための方法について研究内容をまとめている。この項では、研究の目的に関して以下に述べる。

回転軸モニタリングシステムの技術課題である、高機能センシングと測定データの系外伝送システムについて、各々FBG センシングと軸外周から光学的空間伝送の採用により、コスト低減とメンテナンス性の改善を可能にするシステムを提案している。FBG 方式による高機能センシングとは、張線角度や取り付け位置が異なる相互に精度補完しあう複数センサを組合せて対センサとし、最小のセンサ構成で多種類の物理量（軸力、トルク、曲げモーメント、温度など）を精度良く測定できる測定システムを指す。また、軸外周からの光学的空間伝送とは、回転軸（外周）側と固定側間に個別に設置された光学的伝送装置において、軸回転数毎生ずる光結合機会に、間欠的に測定データが空間光伝送されることを指す。提案システムの実用化にむけ、FBG 方式による高機能センシングと軸外周からの光学的空間伝送による計測手法について、性能予測指標を含めその有効性を検証し、現システム仕様の性能レベルの実験による確認と課題解決の方向性を示すことが本研究の目的である。提案する回転軸モニタリングシステムの概略を図 1.1 に示す。

図 1.1 には、FBG 方式光ファイバセンサ、ファイバ、ならびにセンサの光学的情報を回転軸外周から非接触で伝送する装置（光学的空間伝送装置）が示される。回転軸に光ファイバケーブルと FBG センサを取り付け、回転軸と固定床に分けて、治具で対向するよう配置された二つのコリメータにより光が空間伝送される。なお、回転軸と固定側との空間光伝送は、軸回転により間欠的に行われる。その後、光は再度光ファイバケーブルを通り計測器で波長を測定された後、コンピュータに取り込まれ必要なデータ処理がなされる。また、図の温度センサはひずみの影響をうけないよう測定対象物に固定されていない。

本研究では回転軸モニタリングシステムの具体例として船舶主機の軸馬力計測を想定し、回転軸表面のねじりによるひずみ分布測定を、提案する手法を用いて行う。図 1.2 に、課題解決にむけた研究の進め方として、実験と解析により手法の有効性確認を行う手順を示す。

図では、技術課題である FBG センシングの測定精度や回転軸外周からの間欠的な空間光伝送性能について個別の基礎性能確認試験の後、各々静止ねじり負荷試験と FEM 解析、回転無負荷試験を実施してから、総合的な性能検証のため回転ねじり負荷試験を行うことを示している。総合的な性能検証の判断目安は、当面「総トン数が 1,000～10,000 t 程度、主たる航路が国内・東アジア・東南アジアの船級である近海航路船へ適用可能」であると次の理由から定める。

- ・ 比較的隻数が多い
- ・ 航路が国内を含むアジア海域なので対応が比較的やりやすい。
- ・ 軸回転数が 150～300rpm（軸回転速度 2～4m/sec）で比較的低速である。
- ・ トラブル時など緊急対応が可能である。

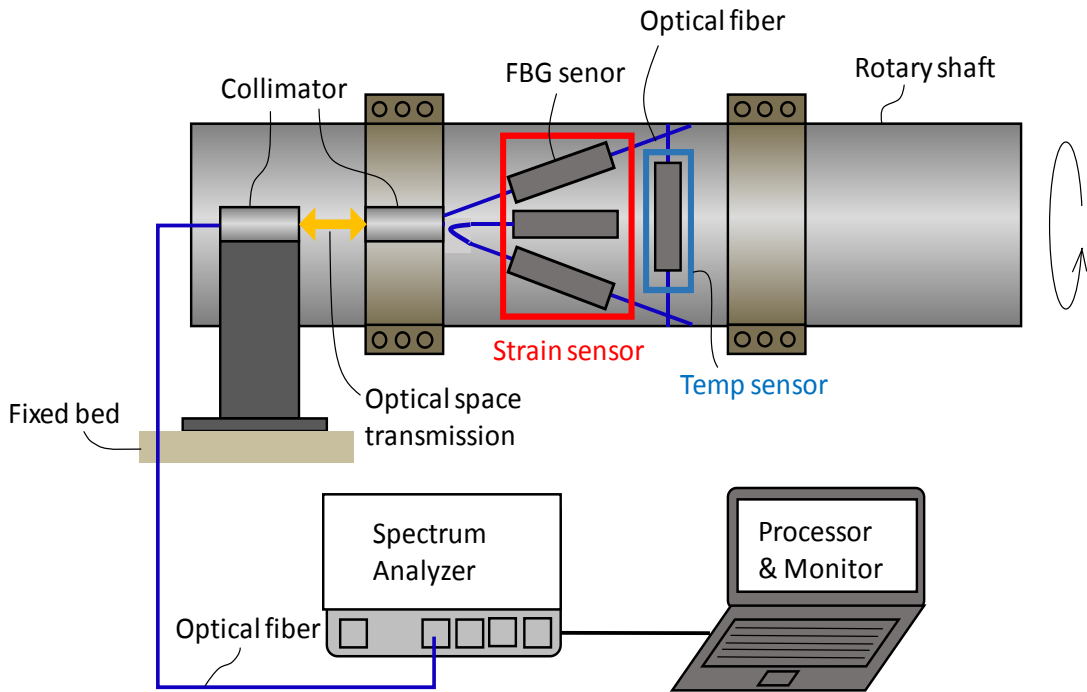


Fig1.1 Summary of monitoring system for rotary shaft

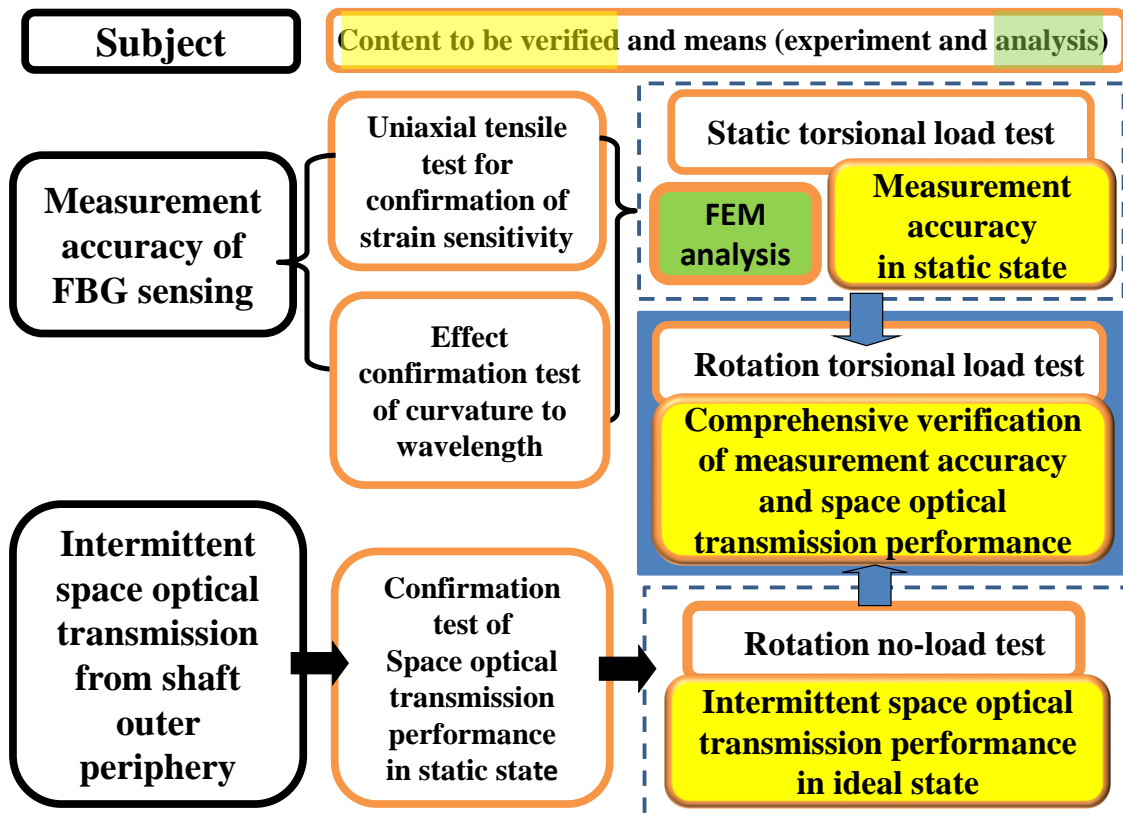


Fig.1.2 Procedure of verification by experiment and FEM

1.2.2 本論文の構成

第1章は、序論であり本研究の背景と本論文で扱う問題の意義や研究の目的および論文の構成について述べている。

第2章では、回転軸モニタリングの基礎の基礎として、回転軸モニタリングシステムの構成、およびFBG方式光ファイバセンシングに関してその原理、FBGセンサの感度や固定方法について説明する。

第3章では、光ファイバセンシングを回転軸モニタリングへ適用する際、課題となる回転軸から測定データの取り出しに対し、回転軸外周に取付けた光学的空間伝送装置により行う計測手法の性能評価について述べる。回転軸中心にロータリコネクタを取り付け、あるいは無線方式により、測定データの系外伝送を行うのが主流である。しかし、測定装置が高価となり、軸に加工が必要になるなどの問題がある。回転軸の外周から空間光伝送によって測定データを取り出すことが可能であれば、現在運転中の回転軸に取り付けて測定できることや高価なロータリコネクタなどの装置が不要となるために、従来の方法と比べコスト削減とメンテナンス性の向上を同時に実現することができる。したがって、本章ではFBG方式の光ファイバセンサを使用した回転軸モニタリングシステムを製作し、旋盤で回転無負荷試験を行い間欠的な空間光伝送とその性能評価指標の有効性について確認したことを示す。

第4章では、測定に使用するFBGセンシングに関し、円筒体表面で測定ねじりひずみ分布の精度評価について述べる。洋上風力発電などエネルギー分野では、過酷な環境下で長期間稼動する構造物のメンテナンスに対し、遠隔地から運転状況を常時監視するモニタリングシステムのニーズが高く、光ファイバセンシングの主要な適用分野の一つである。また、設備には、常時過酷な運転荷重としてねじりをうける回転軸も多く含まれており、常時運転機器だけに、そのメンテナンスは重要である。一方、地球環境問題およびコスト削減面から船舶の省エネルギー運航への要求や国際海運における省エネルギー規制により、

船舶の正確な軸馬力計測のニーズが高まっている。しかし、曲率の大きな曲面への、光ファイバセンサの取付け使用例は少ない。線センサである光ファイバセンサは、点センサである従来方式以上に曲率の影響をうけやすいと考えられる。特に、軸方向に角度をとって張線するねじりによるひずみ計測の場合には、測定精度に与える影響を把握しておく必要がある。また、互いに精度補完しあう複数のセンサの組合せも、ひずみ計測精度の向上には有効と思える。本章では、円筒体表面のねじりによるひずみ分布の測定に FBG 方式の光ファイバセンサを使用する場合の精度について、大きな曲率の影響と互いに精度補完しあう複数センサの組合せる FBG 対センサに着目した。そのため、FBG センサの精度に影響を与える諸要因の確認試験を行ったうえで、円筒体に取り付けた FBG 光ファイバセンサの性能評価のためにねじり負荷試験を行った。円筒表面に発生するねじりひずみ分布や温度の測定結果をもとに、FEM 解析結果との比較を含め計測手法の有効性を評価したことを示す。

第 5 章では、1～4 章を踏まえ回転軸モニタリングシステム的具体例として軸馬力計測システム（回転軸表面のねじりひずみ分布測定）を想定し、FBG 対センサとその測定データの軸外周からの間欠的な空間光伝送による系外取り出しからなる計測手法に関し、回転試験装置にて回転ねじり負荷試験を行ったうえでの総合的な性能評価について述べる。実環境に近い回転試験装置での回転ねじり負荷試験であるので、FBG 対センサの測定精度については、静止ねじり試験に対し回転負荷による影響をうけ、更に軸外周からの間欠的な空間光伝送については、回転無負荷試験に対しねじり負荷による影響をうける。本章では、静止ねじり試験に対し回転負荷による影響をうけた FBG 対センサの測定精度の評価を行い、次いで近海航路船の軸馬力計測への適用を想定し、回転無負荷試験に対しねじり負荷による影響をうけた軸外周からの間欠的な空間光伝送性能を評価した結果を示す。

第 6 章では結論を述べ、回転軸モニタリングについて今後の展開について示す。

参考文献

- (1) 国土技術政策総合研究所, 構造ヘルスマモニタリング技術の解説資料(案), 資料 2-4-4,
http://www.nilim.go.jp/lab/ieg/tasedai/shiryou/10223_2_4_4.pdf.
- (2) 玉越隆史, 国土交通省における橋梁維持管理の現状と課題,
(財)首都高速道路技術センター技術講演会, 2011
- (3) 三田彰, 構造性能とヘルスマモニタリング,
<http://www.mita.sd.keio.ac.jp/publications/data/g200101.pdf>.
- (4) Bosselmann, T., Willsch, M. and Ecke, W., The rising demand for energy:
a potential for optical fiber sensors in the monitoring sector, Proc. of SPIE
Vol.6933, 69330G(8pp), (2008), doi:10.1177/12.780718.
- (4) 武田展雄, 構造ヘルスマモニタリング技術の研究開発, 日本航空宇宙学会誌, Vol.52,
No.605(2004), pp.142-148.
- (5) 保立和夫, 村山英晶監修, 光ファイバセンサ入門,光防災センシング振興協会, 2012.
- (6) Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., Shunk, D. D., Stinemates, D. W. and Nadler,
B. R., A review of structural health monitoring literature: 1996-2001, Los Alamos
National Laboratory Report, LA-13976-MS, 2003.
- (7) Ye, X. W., Su, Y. H. and Han, J. P., Structural health monitoring of civil
infrastructure using optical fiber sensing technology: a comprehensive review,
The Scientific World Journal, Vol. 2014, Article ID 652329(11pp),
doi:10.1155/2014/652329.
- (9) 三田彰, スマート建築構造物と光ファイバセンサ, 第 50 回理論応用力学講演会講演
論文集 (2001), pp.527-528.
- (10) 石原孟, 我が国の洋上風力発電の技術課題と将来展望, コースタル・テクノロジー2012
特別記念講演(2012年12月3日), CDIT2013▷No.39, pp. 14-19.

- (11) Hughes, G., The Performance of Wind Farms in the United Kingdom and Denmark, the Renewable Energy Foundation, 2012, pp. 7-21.
- (12) 牛山泉, とことんやさしい風力発電の本(2010), pp. 56-116, 日刊工業新聞社.
- (13) 日本海事協会, GHG 排出削減に関する MARPOL 条約発効に向けた NK の取組み, ClassNK 秋季技術セミナー, 2012.
- (14) 日下部佳子, 功刀竜介, 対馬和弘, <連載>EEDI<上>/海運・造船の何がかわるか, 日刊海事プレス, 9月28日(2011), pp.4-5, 株式会社海事プレス社.
- (15) 三上郁夫, 琉球海運の省エネ運航の取組み, 日本船舶機関士協会, <<http://www.marine-engineer.or.jp/images/2013ppt3.ppt>> (2013), pp.12-14, (参照日 2014年5月28日).
- (16) 加納敏幸他, 実海域船舶性能データの Visual Mining Studio を用いたマイニング, 数理システム ユーザーコンファレンス, 2012.
- (17) 中島富雄, 繰返し荷重を受ける場合の FBG センサを用いたひずみ計即時自己温度補償方法, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 79, No. 807(2013), pp. 1555-1558.
- (18) Schroeder, K., Ecke, W., Apitz, J., Lembke, E. and Lenschow, G., A fibre Bragg grating sensor system monitors operational load in a wind turbine rotor blade, Meas. Sci. Technol. 17(2006)1167-1172, doi:10.1088/0957-0233/17/5/S39.
- (19) Lee, J. M. and Hwang, Y., A novel online rotor condition monitoring system using fiber Bragg grating (FBG) sensors and a rotary optical coupler, Meas. Sci. Technol. 19(2008)065303(5pp), doi:10.1088/0957-0233/19/6/065303.
- (20) 日刊海事プレス, MHI マリンエンジ, 無線式の光学軸馬力計を開発, 日刊海事プレス, 5月17日(2013), p.10, 株式会社海事プレス社.

第 2 章 回転軸モニタリングの基礎

2.1 回転軸モニタリングシステムの構成

図 2.1 に、回転軸モニタリングシステムの概略を示す。回転軸モニタリングシステムは、FBG 方式光ファイバセンサ、ファイバ、ならびに光学的空間伝送装置から構成される。光学的空間伝送装置は、センサの光学的情報を回転軸から非接触で伝送する装置である。

回転軸に光ファイバケーブルと FBG センサを取り付け、回転軸と固定床に分けて、治具で対向するよう配置された二つのコリメータにより光が空間伝送される。なお、回転軸と固定側との空間光伝送は、軸回転により間欠的に行われる。その後、光は再度光ファイバケーブルを通り計測器で波長を測定された後、コンピュータに取り込まれ必要なデータ処理がなされる。

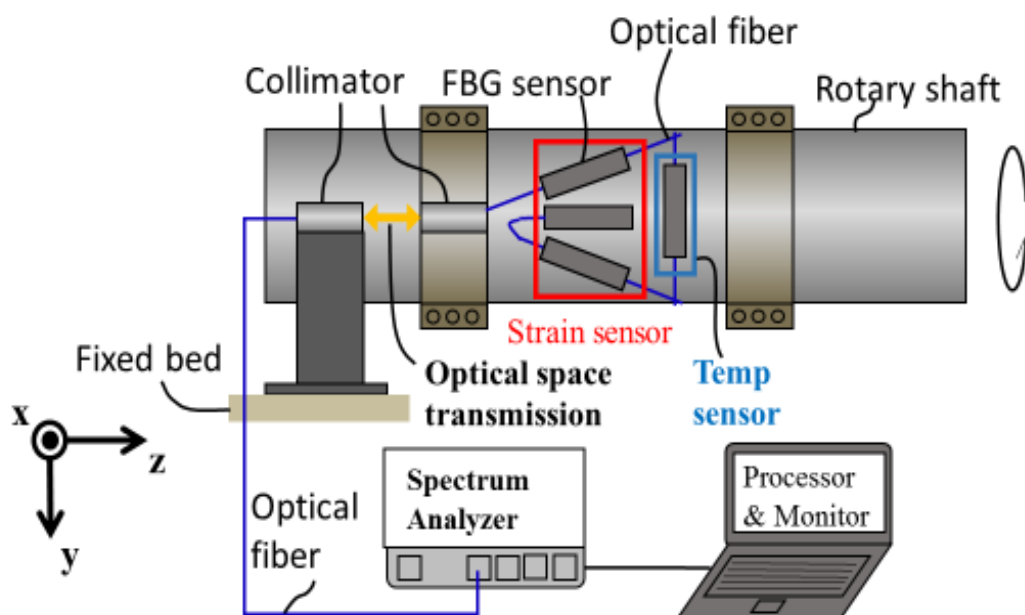


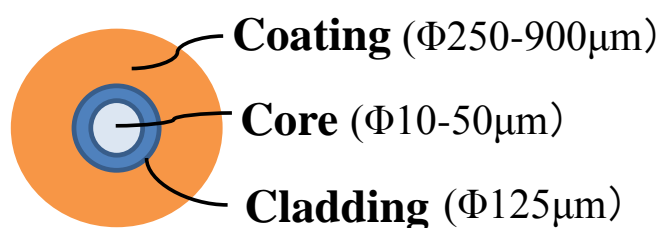
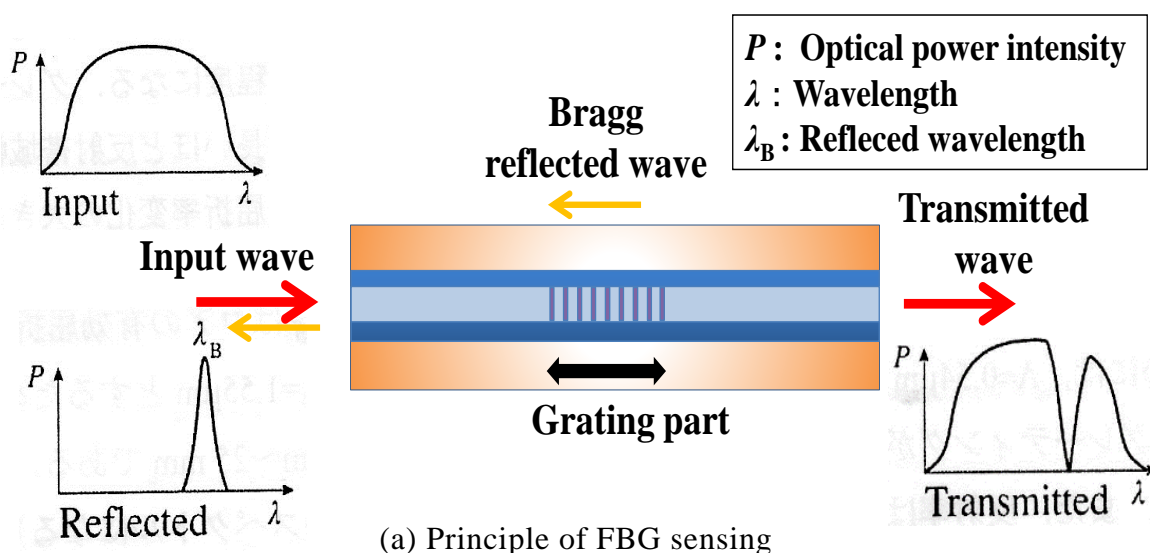
Fig.2.1 Measurement system

2.2 FBG 方式光ファイバセンシング

2.2.1 FBG センシングの原理

FBG センシングの原理について文献⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾をもとに以下で簡単に説明する。光ファイバセンシングには BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectmeter), ROTDR (Raman Optical Time Domain Reflectmeter) の分布型センサや FBG の準分布型 (多点型) センサがある⁽⁹⁾。本研究では, 応答性や測定精度, 多用途性などを考慮し, FBG 方式の準分布型 (多点型) センサを採用する。

図 2.2 に FBG センシングの原理を示す。FBG センサはグレーティングの周期が作るブラッグ反射条件を満たす波長の光のみを反射する。



(b) Cross section of optical fiber

Fig.2.2 Summary of FBG sensing

2.2.2 FBG センサの感度

(1) ひずみ感度

FBG センサはグレーティングの周期が作るブラッグ反射条件を満たす波長の光のみが反射される原理にもとづいており，FBG の反射波長 λ は FBG のグレーティング間隔 Λ ，コアの屈折率 n によって式 (2.1) で決定される．

$$\lambda = 2n\Lambda \quad (2.1)$$

したがって，FBG の反射波長 λ は Λ および n を変化させるひずみや温度等の物理変化量に応じて波長シフト量 $\Delta\lambda$ だけ変化する．そのため，この波長シフト量によりひずみや温度を計測できる．屈折率の変化量 Δn やグレーティング間隔の変化量 $\Delta\Lambda$ ，ひずみによる屈折率変化の寄与を表す光弾性係数 P_e とひずみ ε の間に各々 $\Delta\Lambda/\Lambda = \varepsilon$ ， $\Delta n/n = -P_e\varepsilon$ とにおいて，波長シフト量 $\Delta\lambda$ (pm)とひずみ ε ($\mu\varepsilon$)の関係は式 (2.2) で与えられる．

$$\Delta\lambda = \lambda(1 - P_e)\varepsilon \quad (2.2)$$

ここに，ひずみ感度 ($\Delta\lambda/\varepsilon = \lambda(1 - P_e)$) は FBG グレーティング部の製造方法や測定条件により変化するが，平面かつ反射波長が 1550 nm の場合，約 1.2 pm/ $\mu\varepsilon$ といわれている．

(2) 光弾性係数

光弾性係数 P_e の理論値は式 (2.3) で表され， P_{11} ， P_{12} はひずみ光学テンソル成分であり， ν はポアソン比， n は屈折率である．ゲルマニウム添加光ファイバで，センサの反射波長 1550nm，ひずみ感度 1.2pm/ $\mu\varepsilon$ の場合，式 (2.2) より， P_e は 0.22 となる⁽⁴⁾⁽⁵⁾．

$$P_e = \frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \quad (2.3)$$

ただし、一般に平面の場合の値である。

(3) 温度感度

FBG に温度変化を与えた場合には、温度変化量 ΔT により屈折率やグレーティング間隔が変化するので、屈折率温度係数 ζ や光ファイバの線膨張係数 α を用いて波長シフト量と温度変化量の関係は式 (2.4) で与えられる。

$$\Delta\lambda = \lambda(\zeta + \alpha)\Delta T \quad (2.4)$$

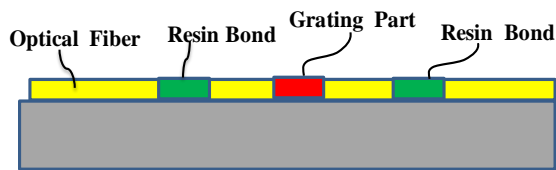
温度感度 ($\Delta\lambda/\Delta T = \lambda(\zeta + \alpha)$) は、センサの材質・製造方法や試験方法にも依存するが、反射波長が 1550 nm で室温の場合、9.5~14 pm/°C 程度といわれている。したがって、ひずみ計測において温度の影響を一般に無視することはできず温度補正が必要となる。

2.2.3 FBG センサと固定方法

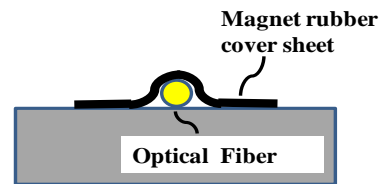
(1) FBG ひずみセンサ

図 2.3 は、FBG ひずみセンサを示す。図 2.3(a)は、ファイバ素線を直接測定対象物にボンドを用いて取付ける方法 (Type A) である。現場で施工しなければならないために使い勝手が悪い。図 2.3(b)は、施工の便宜性を考慮して中間に取付け用ゴムマグネットシートを介在させる方法 (Type B) である。ゴムマグネットシートにあらかじめセンサをボンドで固定しておくことができるのに加え、測定したい場所に貼り付けることができるので取り扱いが簡単となる。図 2.3(c)は、取付け用ゴムマグネットシートでファイバ素線をカバーし、測定対象物に押し付け固定する方法 (Type C) である。この方法は、ボンドを使

わないので一番容易に固定できる方法である。図 2.3(d)は、耐環境性向上と固定性をより安定させるために測定物にセンサをボンドで固定した後、ゴムマグネットシートをカバーする方法 (Type AC) である。最後に図 2.3(e)は、マグネットシートの上にセンサをボンドで固定した上にさらにマグネットシートをかぶせる方法 (Type BC) である。

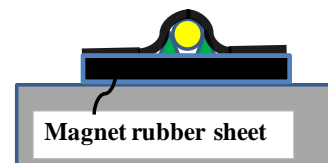


(a) FBG basic sensor (Type A)



(b) FBG unit sensor (Type B)

(c) FBG unit sensor (Type C)



(d) FBG basic sensor (Type AC)

(e) FBG unit sensor (Type BC)

Fig. 2.3 Fixed method of FBG

Table2.1 Fixing method of FBG sensor

Sensor type	Sensor division	Magnet rubber		Fixing means	
		Mounting sheet	Cover sheet	Resin bond	Magnetic force
A	Basic	-	-	○	-
B	Unit	○	-	○	○
C	Unit	-	○	-	○
AC	Basic	-	○	○	○
BC	Unit	○	○	○	○

表 2.1 は，FBG ひずみセンサの固定方法をまとめて示す．表から Type AC，Type BC のセンサは耐環境性向上と固定性をより安定させていることがわかる．

本研究で使用したセンサは，単軸引張試験には Type C，ねじり試験には Type AC と Type BC である．

(2) FBG 温度センサ

FBG 温度センサには，ひずみの影響をうけないように，据付け時に初期張力をかけず，ケーブルに余裕を持たせて緩く対象物に取り付ける基本型（Type BT），およびゴムマグネットシートに細いパイプをボンドで取り付けて，そのパイプ内にセンサを固定せず通したユニット型（Type UT）の温度センサがある．

参考文献

- (1) 保立和夫, 村山英晶監修, 光ファイバセンサ入門(2012), pp.105-125,
光防災センシング振興協会.
- (2) 根本勇, 廣瀬浩二, 角谷久子, 藤島絵里子, 森山健二, FBG を用いた光ファイバセンサ
について, 共和技報 533, DEC.2005(2005), pp. 4109-4113.
- (3) 中島富雄, 繰返し荷重を受ける場合の FBG センサを用いたひずみ計即時自己温度補償
方法, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 79, No. 807(2013), pp. 1555-1558.
- (4) Arsenault, T., Achuthan, A., Marzocca, P., Grappasonni, C. and Coppotelli,
G., Development of a FBG based distributed strain sensor system for wind turbine
structural health monitoring, Smart Mater. Struct.
22(2013)075027(11pp), doi:10.1088/0964-1726/22/7/075027.
- (5) Doyle, C., Fiber Bragg Grating Sensors An Introduction to Bragg gratings and
interrogation techniques, Technical Report(Bracknell:Smart Fibres Ltd 2003),
<http://www.researchgate.net/publication/265307606/>(accessed on 11 September
2015).

第3章 FBG センシングによる回転軸 の空間光伝送性能評価

3.1 緒言

船舶分野において、国際海運におけるエネルギー規制ならびに船舶の燃費改善が必要とされており、船舶の正確な馬力計測のニーズが強く存在している⁽¹⁻³⁾⁽⁴⁾。最適航路の選択や最適船速は大きな省エネ効果があるとされており、最適船速計画には正確な出力-速力のパワーカーブが必要になるので、そのために正確な軸馬力計のニーズが強い⁽⁵⁾⁽⁶⁾。他にも、洋上風力発電設備でも設備モニタリングの必要性がいわれており、中核となる回転軸モニタリングへの関心も高い。

構造健全性モニタリングには、電気式センサや光ファイバセンサを用いる方法などがある。中でも、光ファイバセンサは伝送損失が極めて小さく長距離測定が可能、信頼性が高く分布計測が可能などの特徴から、構造健全性モニタリングに使用されることが多い⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

光ファイバセンシングの回転軸への適用は、回転軸中心にロータリコネクタを取り付け、あるいは無線方式により、測定データの系外伝送を行うのが主流である。しかし、測定装置が高価となり、軸に加工が必要になるなどの問題がある。回転軸の外周から空間光伝送によって測定データを取り出せれば、運転中の船舶に取付けて軸馬力を測定できることや高価なロータリコネクタなどの装置が不要となるため、従来の方法と比べコスト削減とメンテナンス性の向上を同時に実現できる。また、船舶の主機軸回転数は 100-400 rpm と比較的低速であるために、空間光伝送を利用できる可能性がある。

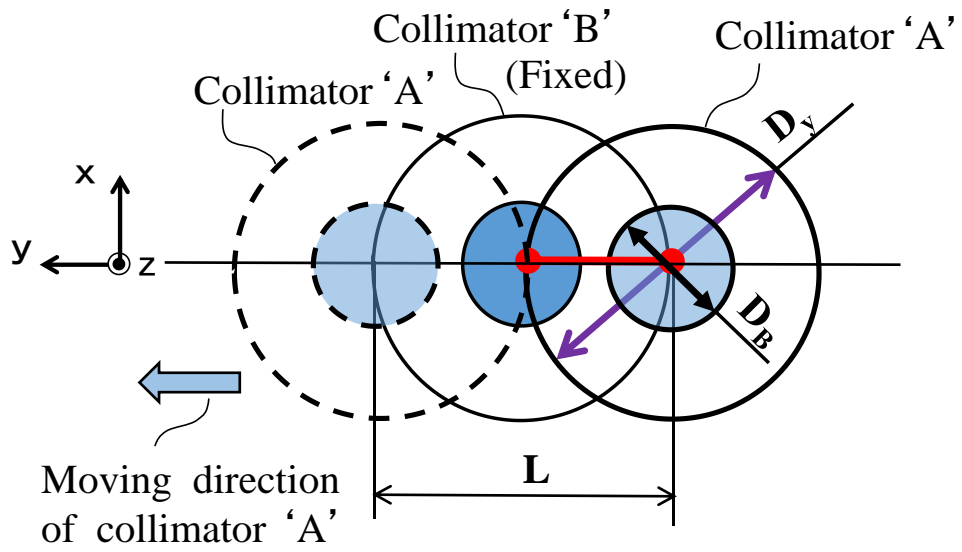
本章では FBG 方式の光ファイバセンサを使用した回転軸モニタリングシステムを製作し、回転軸外周から測定データを取り出せるよう光学的空間伝送装置を取り付けて回転試験を行い、間欠的な空間光伝送とその性能評価指標の有効性について確認した。

3.2 間欠的な空間光伝送の原理と性能評価指標

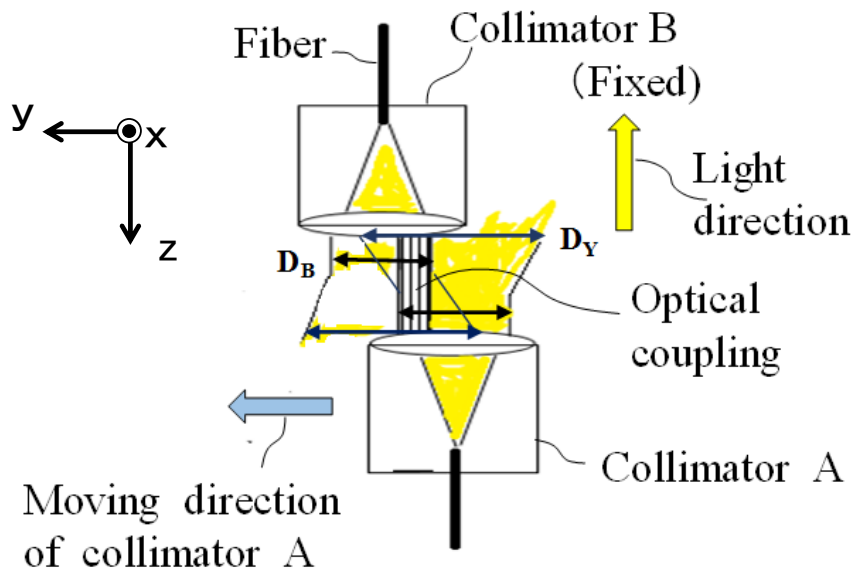
3.2.1 間欠的な空間光伝送の原理

図 3.1 に、コリメータによる空間光伝送の概要を示す。空間光伝送による接続は、ガラスと空気という屈折率の異なる媒体間の伝送、光の直進性を考慮しなければならず、高度な光軸調整が必要となる。さらに光ファイバセンシングでは、光の波長とパワーといった特性を伝送する必要がある。ここで、図中の D_B はコリメータの Beam Waist 径（レーザー光線の収束径）、 D_y は波長検出可能径を示し、コリメータ A は発光・移動、コリメータ B は受光・固定と仮定している。コリメータ A が y 方向に移動する場合、コリメータ B の D_B で受光可能なコリメータ A の光軸径が D_y となる。 D_y は、 D_B に対し光軸の拡がりにより光パワーが低下するもので、静的状態では、図に示すように、光伝送を維持できるコリメータ A の y 方向移動距離 L_0 に等しい。この L_0 を基準光軸間距離と定める。

図 3.2 に、間欠的な空間光伝送の成立に関わる相対的時間関係を示す。ここで、光軸維持時間 T_1 、有効掃引可能時間 T_{E1} 、計測器のサンプリング周期 T_2 、波長掃引時間 T_3 とし、波長掃引時間とは波長掃引光源から出射される光が掃引範囲の波長を掃引し終えるまでの時間を指している。光軸維持時間は光軸間距離を回転速度で除した値であり、また図の光結合係数 (Optical coupling coefficient) とは、光結合機会における対向するコリメータの受光パワーで、光軸間距離がゼロの場合を最大とし、光軸間距離の増加に伴い低減する度合いを示している。この空間光伝送の時間関係 $T_1 > T_{E1}$ 、 $T_2 > T_3$ において、有効となる測定条件は $T_{E1} > T_3$ かつ T_3 の開始・終了時刻が T_{E1} 内の場合のみとなる。



(a) Section of x-y



(b) Section of y-z

Fig. 3.1 Optical coupling by confrontation

T_{E1} : Effective sweep possible time T_1 : Optical axis retention time

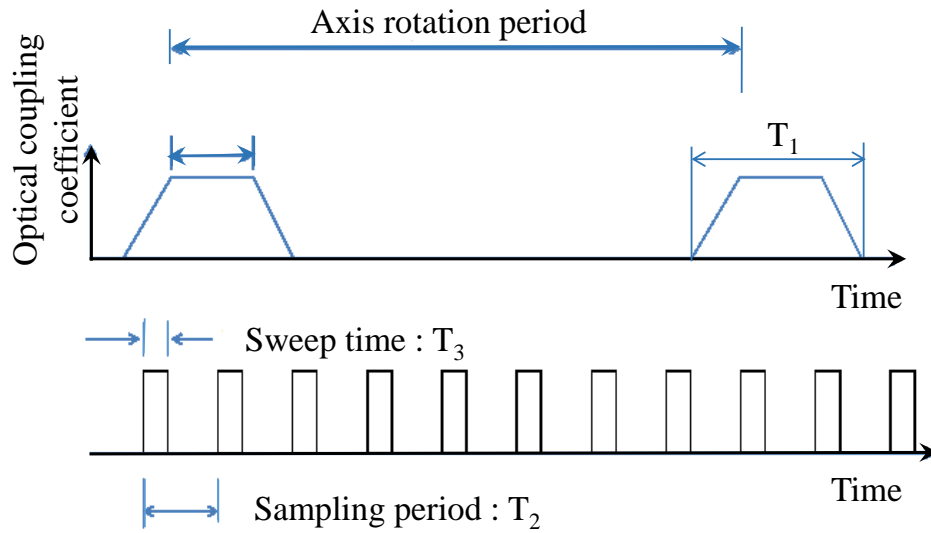


Fig. 3.2 Intermittent optical space transmission

以上の時間関係において、大きな回転速度や外乱要因による光軸のズレ等が生ずる場合、 T_1 が小さくなり空間光伝送の実現は難しくなる。光結合の開始・終了は操作できないので、測定精度向上には確率的事象として測定回数を増加させる必要がある。

3.2.2 間欠的な空間光伝送性能の評価指標

間欠的な空間光伝送においては、その性能評価のための指標として、回転速度ごとのデータ取得率やデータ取得回数および光学的特性起因の波長シフト量を導入した。

実験結果として求まるデータ取得回数 N_e とデータ取得率 $d_1(\%)$ との関係は式 (3.1)、および光結合機会数 n_c は軸回転数 $R_c(\text{rpm})$ 、測定時間 $\Delta T(\text{sec})$ を用いて式 (3.2) となる。

$$d_1 = 100 \times \left(\frac{N_e}{n_c} \right) \quad (3.1)$$

$$n_c = \left(\frac{R_c}{60} \right) \times \Delta T \quad (3.2)$$

ただし、データ取得回数は測定時間内にデータ伝送・取得に成功した回数とする。次に理論的なデータ取得率 d_2 は計測器サンプリング周波数 $n_s(\text{KHz})$ に有効掃引可能時間 $\Delta T_s(\text{ms})$ を用いて式 (3.3) で表される。ここで、 ΔT_s は有効光軸間距離 L_e 、回転速度 $v_\theta(\text{mm/ms})$ 、波長掃引範囲 $\Delta\lambda_s(\text{nm})$ 、波長掃引速度 $v_s(\text{nm/ms})$ 、有効光軸維持時間 $t_e(\text{ms})$ ($t_e = L_e/v_\theta$)、データ伝送・掃引時間 $t_r(\text{ms})$ ($t_r = \Delta\lambda_s/v_s$) を用いて式 (3.4) で表される。 v_θ については、軸中心とコリメータ中心との距離を示す回転半径 $r(\text{mm})$ を用いて式 (3.5) となる。

$$d_2 = 100 \times n_s \times \Delta T_s \quad (3.3)$$

$$\Delta T_s = t_e - t_r = \left(\frac{L_e}{v_\theta} \right) - \left(\frac{\Delta\lambda_s}{v_s} \right) \quad (3.4)$$

$$v_\theta = 2 \times \pi \times r \times \left(\frac{R_c}{60000} \right) \quad (3.5)$$

ここで、基準光軸間距離 L_0 は静的状態のもので、 L_e は L_0 に対し実際の測定中に各種の外乱要因から生ずる対向コリメータレンズ間の光軸のズレにより減少した値となる。 ΔT_S は t_e から光結合開始・終了前後の不安定伝送時間と重なる t_r を差引いたもので、 ΔT_S 内のサンプルリングであれば有効な掃引が可能であることを意味している。

式 (3.4) を式 (3.3) に代入すると d_2 は式 (3.6) で得られる。これから式 (3.1) より実験結果から得られた d_1 と比較が可能になる。さらに式 (3.6) を変形した式 (3.7) を用いて、 d_1 から L_e を推定できる。

$$d_2 = 100 \times n_s \times \left[\left(\frac{L_e}{v_\theta} \right) - \left(\frac{\Delta \lambda_s}{v_s} \right) \right] \quad (3.6)$$

$$L_e = v_\theta \times \left[\left(\frac{d_2}{100} \right) \left(\frac{1}{n_s} \right) + \left(\frac{\Delta \lambda_s}{v_s} \right) \right] \quad (3.7)$$

3.2.3 光学的特性起因の波長シフト

(1) 光学的特性起因の波長シフトの概念

光学的特性起因の波長シフトとは、光学的結合特性に起因する（要因 A）と低光強度に起因する（要因 B）により生ずる波長の変化を指し、受光器増幅用対数アンプを使用した計測器と間欠的な空間光伝送の場合に顕著な現象になるといわれている⁽⁹⁾。

図 3.3 に、FBG スペクトラムとその半値幅（ピークから半分のスペクトラム波形の幅で FBG センサ特性を表す、標準で 0.25nm 以下）を示す。FBG センサの中央波長の決定は、中央値そのものを直接検出しているわけではなく、半値幅以上のスペクトラムのスロープから近似している。一般的には二次曲線近似による頂点をピークとし、それを中央波長と決定している。こうした決定方式をとる理由は、FBG グレーティングの製作精度の影響をう

けて反射波長が変動し、図には示すことはできないが、スペクトラム頂点近傍では波を打っており頂点が一義的には決まらないためである。このため、複数回の測定データを平均化処理して測定精度を高めている。この平均化処理に必要なデータ数を取得可能な装置仕様や測定時間の目安は、前節のデータ取得率を使用して決めることができる。また、半値幅以上のスペクトラムで昇降スロープが検出されない場合は、ピーク不検出と処理される可能性がある。

図 3.4 に横軸を時間とし、縦軸に FBG センサの受光光量および光結合係数を示す。実際の光結合係数は図 3.2 に示す台形ではなく大きな山型となる。また、波長は時間方向に正弦波で順掃引されるので、観測される FBG スペクトラムの形状は本来の形×光結合係数となる。ここで、観測される FBG スペクトラム形状を用い、図に示す 8 個の FBG センサ a~h について、正常測定、不正常測定の判断をまとめる。a, f, g, h の 4 個のセンサで波長は有効光軸維持時間 t_e 外にあるので検出されない。c, d の 2 個のセンサで波長は正常に検出される可能性が高い。b のセンサ波長は要因 A により長波側にシフト、e のセンサ波長は同じく短波側にシフトする可能性が高い。また、b~e のセンサについても、要因 B の低光強度の場合には観測波長が長波側にシフトし、さらに、光結合係数の低下が大きい場合にはピークなしと処理される可能性がある。このように、間欠的な空間光伝送においては、光学的特性に起因する波長シフトの影響を強く受けやすいので、フィルターなどを設けて光学的特性に起因する波長シフトの影響を緩和した上で、通常通り複数回の測定データ平均化処理を行う必要がある。

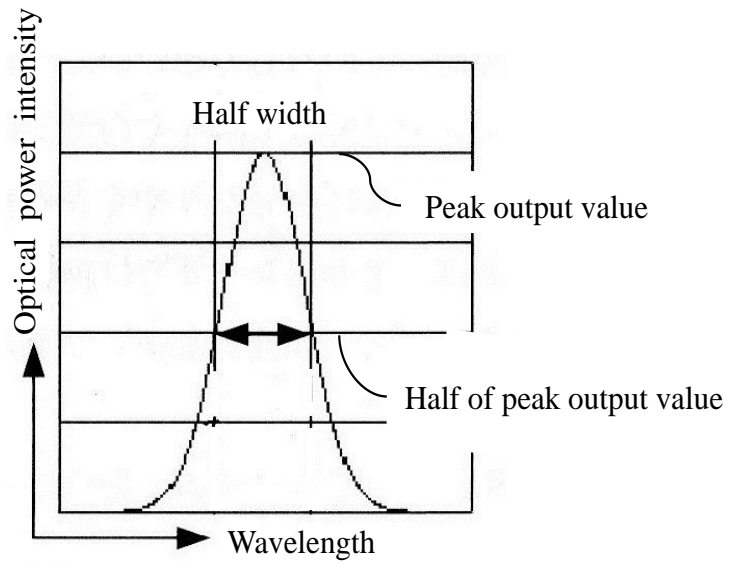


Fig. 3.3 FBG

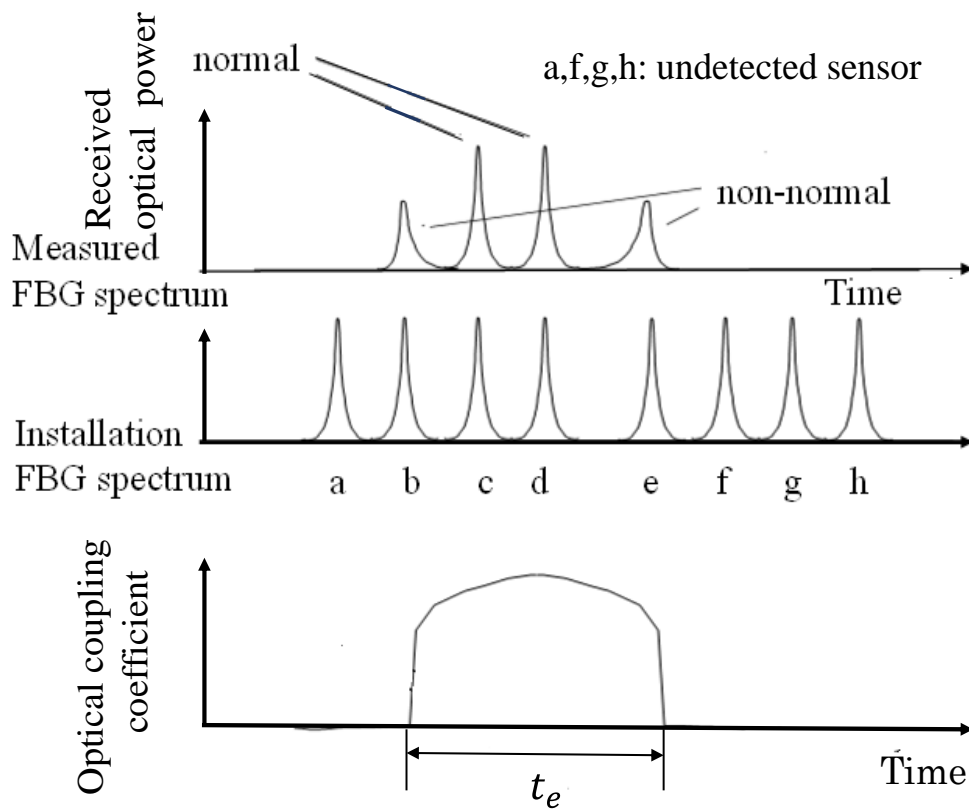


Fig. 3.4 Measured FBG spectrum changes due to optical coupling

(2) 光学的特性起因の波長シフト量の定義式

間欠的な空間光伝送において、前項のように光の結合特性や低光強度などの理由から測定波長のシフトがおこる。光学的特性に起因する波長シフトの影響を緩和するために、次のようなフィルターを設けて、平均化処理に使用できる有効測定データを抽出することが考えられる。

- 1) 設置全 FBG センサの波長検出できた測定のみ有効と判断する。
- 2) 光学的特性に起因する波長シフト量を規制するしきい値を設ける。

ここでは、光学的特性に起因する波長シフト量の規制について検討する。まず検討の基本となる事象を確認するため、無負荷・無ひずみで測定対象の物理変化に起因する波長シフトが生じない回転試験を行う。無負荷の回転試験結果を整理することで、各試験装置の測定信頼性を推定することが可能となる。光学的特性起因の波長シフト量 $\Delta\lambda_s(\text{pm})$ は、測定波長 $\lambda_1(\text{nm})$ 、初期波長 $\lambda_0(\text{nm})$ を用いて式(3.8)になる。

$$\Delta\lambda_s = 1000 \times (\lambda_1 - \lambda_0) \quad (3.8)$$

$\Delta\lambda_s$ を使用して測定データの信頼性を評価するには評価の目安が必要となる。システムのも目的にもよるが評価の目安は、計測器の測定精度や分解能、ならびに測定対象となる物理変化量からみた許容精度などを勘案して決める。

3.3 光学的空間伝送の性能評価

3.3.1 光学的空間伝送装置

(1) 装置の概要

図 3.5 に光学的空間伝送装置として光軸調整用のポジショナー，対向式コリメータ，固定治具を示す．本装置を使用して静的状態での性能確認試験を行い，次に間欠的な空間光伝送性能の確認を目的とし回転試験を行う．これらの試験を通じて基準となる性能，特に有効測定限界となる回転速度や軸回転数，評価指標を求める．

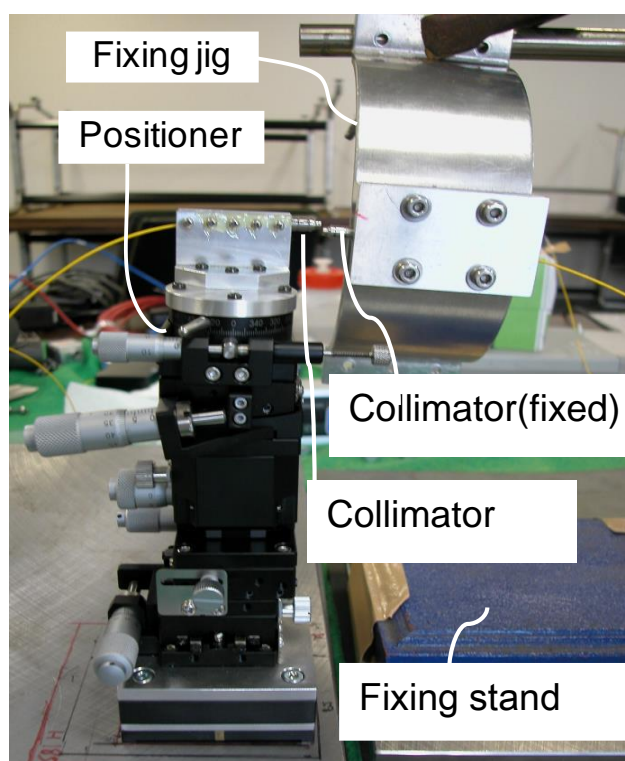


Fig.3.5 Optical space transmission device

(2) 静的状態での性能確認試験

図 3.6 は，図 3.5 の装置を使用して行った静的状態での性能確認試験を模式的に示している．表 3.1 には静的状態でのコリメータ移動距離と光パワー損失の試験結果を示す．表

からコリメータレンズ間の軸距離を固定して、軸直角・水平方向に片方のコリメータをポジションナーで移動させた時、移動距離に応じて波長検出できる光パワー損失がわかる。

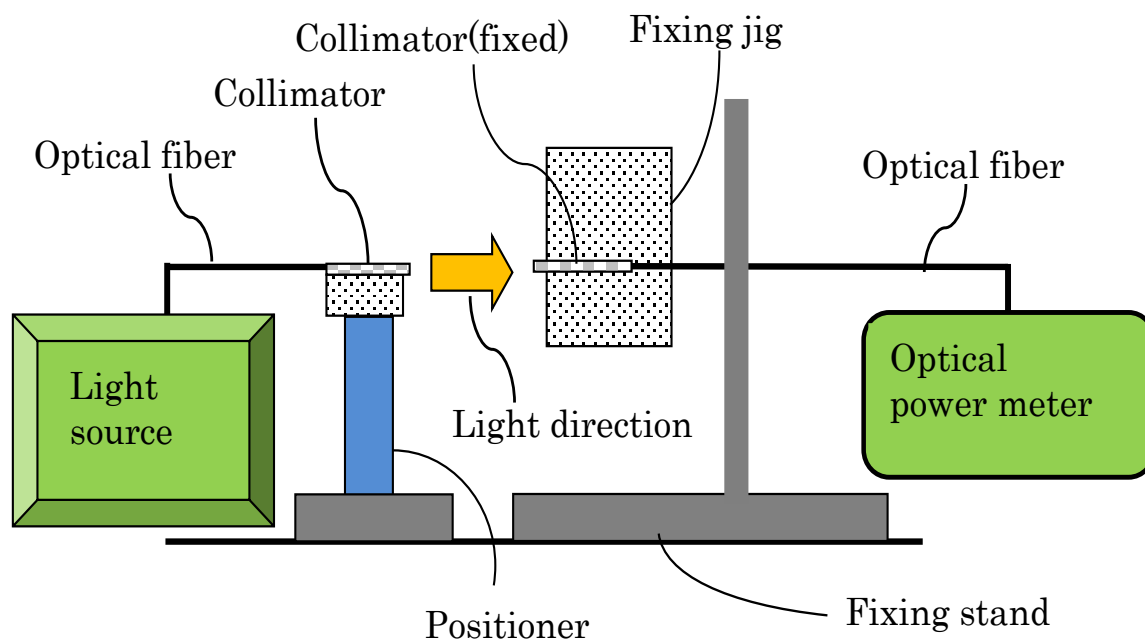


Fig. 3.6 Static performance test

Table 3.1 Results of static performance

Item	Content		
Beam Waist diameter of collimator : D_B	0.3mm		
Optical axis retention performance conformed by tests in stationary state			
Optical power loss [dB]: P_L	-3	-6	-9
Wavelength detectable diameter * [mm]: D_y	0.59	0.83	1.04
Surface distance between opposite lens [mm]	11.45 (standard)		

* Perpendicular to optical axis horizontal direction distance

(3) 基準光軸間距離

基準光軸間距離 L_0 について、表 3.1 に示す静的状態での試験結果から、光パワー損失 P_L (dB)と波長検出可能径 D_y (mm)の関係を表す試験値近似式、式 (3.9) と式 (3.10) を連立させて求める。式 (3.10) の右辺は D_y と D_B を径とする円の面積比から求まる光パワー低下の程度を表し、波長検出可能な P_L の下限を示している。

$$D_y = 0.364 - 0.076P_L \quad (3.9)$$

$$P_L \geq 10 \times \log \left(\frac{D_B}{D_y} \right)^2 \quad (3.10)$$

図 3.7 に波長検出可能径 D_y と光パワー損失 P_L の関係について、 D_B が 0.3mm の場合の計算結果、および試験結果 (●点)、式 (3.9) 試験結果の近似直線 (実線)、式 (3.10) の計算値 (破線) を示す。図中において式 (3.9) と式 (3.10) の交点は A(1.36, -13.1)となる。 D_y の限界値は 1.36mm であるので、 L_0 は制限内の 1.3mm と設定する。

D_y と D_B の差が大きくなるに伴い、光パワーの低下により波長ピーク検出に関する精度が悪化する恐れがあるので、光学的特性起因の波長シフト量 $\Delta\lambda_s$ によるしきい値を設け精度を確保する必要がある。これには、計測器の分解能や測定精度も考慮する。測定ひずみは 100~1000 $\mu\epsilon$ 程度なので、式 (2.2) でひずみ感度は約 1.2pm/ $\mu\epsilon$ として、 $\Delta\lambda_s$ が10pm以下は安定した正常な測定領域、100pm以上となる場合は不正常な測定領域と区分する。

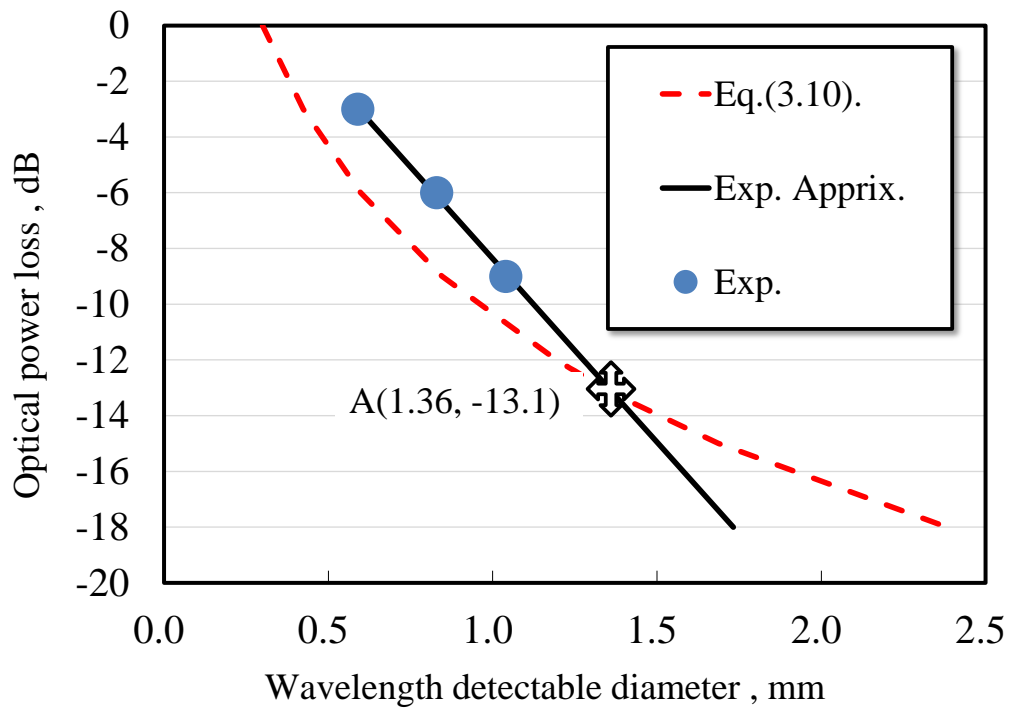


Fig.3.7 Wavelength detectable diameter and optical power loss

3.3.2 回転試験

(1) 試験装置

図 3.8 は回転試験に用いた大日金属工業製の旋盤（型式 DKG-SHB）と試験体を示す。試験体測定部の材質・寸法は配管用炭素鋼鋼管 SGP100A（外径 114.3 mm，長さ 374 mm，肉厚 2mm）で，端部は外径 120 mm（光空間伝送用治具寸法にあわせて）のフランジと鍛造による厚肉円筒構造で双方を溶接接合している。表 3.2 には試作した回転軸モニタリングシステムの構成と仕様を示す。

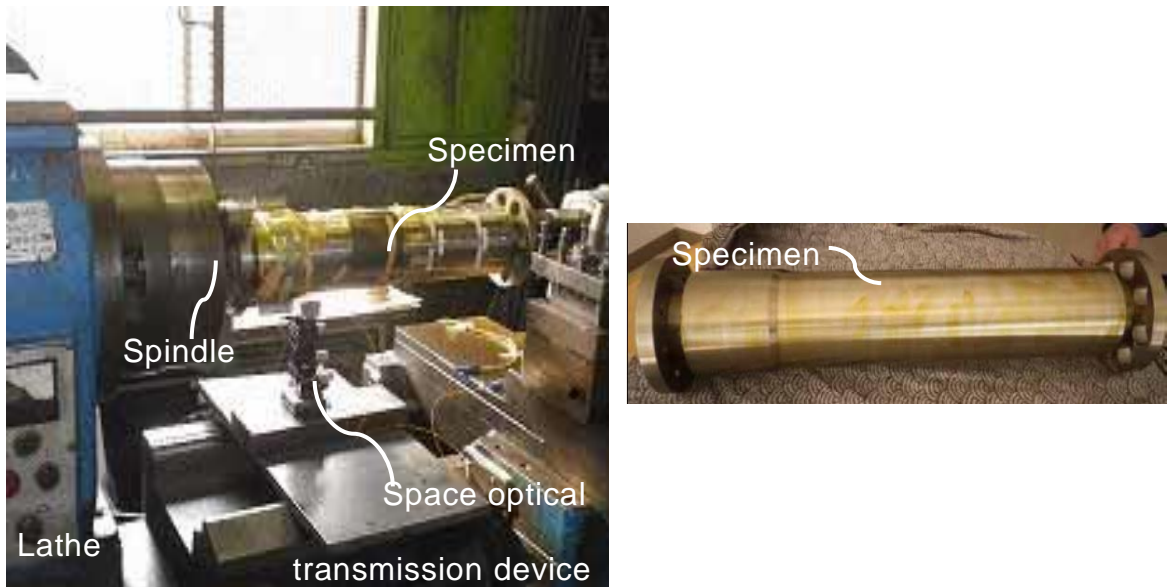


Fig. 3.8 Testing machine and specimen

Table 3.2 Trial production of rotary shaft monitoring

Composition	Specification
Sensor & Fiber	FBG sensor *8
	Single mode optical fiber
Space optical transmission device	Confrontation type collimator
	Positioner
Spectrum analyzer	Anritsu AR4011A

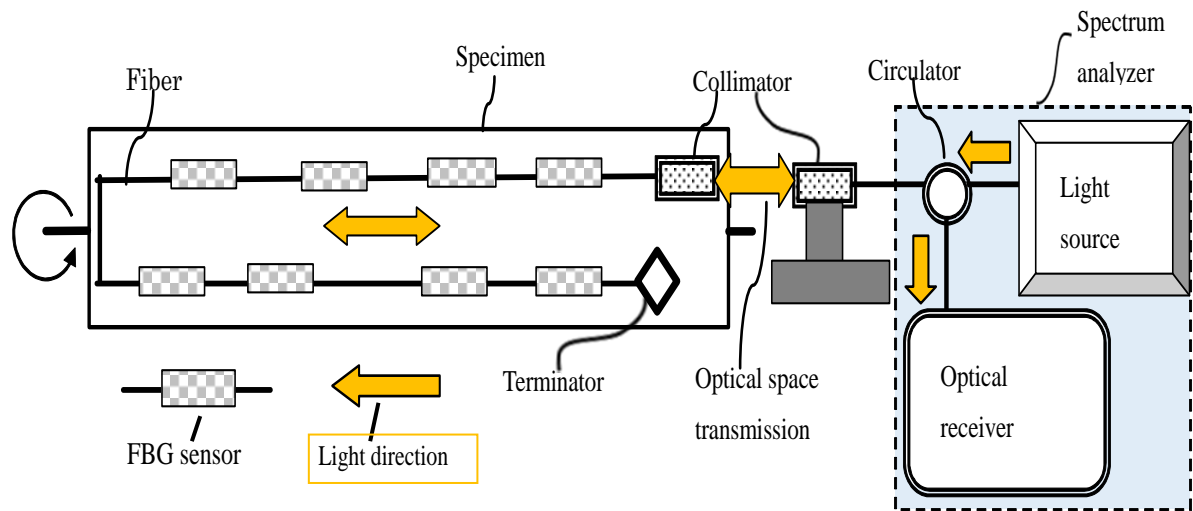


Fig. 3.9 FBG sensors on the specimen

図 3.9 は試験に用いたセンサ配置を示し、センサには 8 個のユニット型センサ (Type B) を使用している。8 個のセンサ特性は半値幅 0.22~0.23nm, 反射率 90%, 中央波長は各々 3~7nm 間隔をあけて 1529nm~1560nm に分布しており FBG センサ波長範囲は 31nm となる。また図に示す計測器は、表 2.2 のアンリツデバイス製 AR4011A FBG センサモニタであり、シングルモード波長掃引光源と対数アンプによる増幅機能付受光器からなる。

(2) 測定波長データ例

表 2.3 に今回の試験で得られた測定波長データ例を示す.

Table 3.3 Example of measured FBG wavelength

Optical coupling opportunity order			FBG①	FBG②	FBG③	FBG④	FBG⑤	FBG⑥	FBG⑦	FBG⑧	Category
0		λ_0 [nm]	1529.370	1533.9107	1538.5019	1542.1924	1546.0036	1549.689	1553.980	1560.040	
1	1	λ_1 [nm]	1529.367	1533.906	1538.499	1542.195	1546.007	1549.694	1553.983	1560.045	
		$\Delta\lambda_s$ [pm]	-3.450	-4.630	-3.190	2.960	3.510	4.940	3.180	5.130	Good
2	1	λ_1 [nm]	1529.370	1533.908	1538.500	1542.195	1546.005	1549.692	1553.982	1560.042	
		$\Delta\lambda_s$ [pm]	-0.440	-2.260	-2.300	2.250	1.810	2.650	2.220	1.840	Good
3	1	λ_1 [nm]									
		$\Delta\lambda_s$ [pm]									Bad
4	1	λ_1 [nm]	1529.369	1533.908	1538.500	1542.194	1546.006	1549.691	1553.980	1560.042	
		$\Delta\lambda_s$ [pm]	-1.300	-2.420	-2.050	1.170	2.290	2.250	0.550	1.810	Good
5	1	λ_1 [nm]	1529.368	1533.905	1538.499	1542.195	1546.007	1549.695	1553.987	1560.052	
		$\Delta\lambda_s$ [pm]	-2.590	-5.670	-2.860	2.280	3.670	5.700	6.700	11.580	Poor
6	1	λ_1 [nm]				1542.295	1546.093	1549.760	1554.040	1560.086	
		$\Delta\lambda_s$ [pm]				102.740	89.150	71.160	60.460	45.330	Bad
7	1	λ_1 [nm]	1529.384	1533.921	1538.512	1542.289	1546.085	1549.762	1554.044	1560.087	
		$\Delta\lambda_s$ [pm]	14.060	10.390	10.090	96.210	81.660	72.730	63.940	47.270	Poor
	2	λ_1 [nm]	1529.367	1533.909	1538.501	1542.196	1546.012	1549.699	1553.996	1560.054	
		$\Delta\lambda_s$ [pm]	-3.090	-1.410	-0.890	3.910	8.740	9.720	16.430	14.280	Poor
8	1	λ_1 [nm]	1529.375	1533.918	1538.511	1542.201	1546.014	1549.699	1553.992	1560.051	
		$\Delta\lambda_s$ [pm]	4.110	7.020	9.550	8.300	10.660	9.590	12.160	10.720	Poor
9	1	λ_1 [nm]	1529.376	1533.918	1538.508	1542.198	1546.008	1549.692	1553.982	1560.043	
		$\Delta\lambda_s$ [pm]	5.970	6.860	5.840	5.560	4.660	2.800	2.200	2.310	Good
	2	λ_1 [nm]	1529.403	1533.971	1538.602	1542.297					
		$\Delta\lambda_s$ [pm]	32.740	60.230	99.820	104.720					Bad
10	1	λ_1 [nm]									
		$\Delta\lambda_s$ [pm]									Bad

軸回転数 $R_c = 200\text{rpm}$, 計測器サンプリング周波数 $n_s = 1.25\text{kHz}$ の試験条件において, 光結合機会数 31 回のうち最初から 10 回分の測定波長 λ_1 を抽出し, 初期波長 λ_0 との差として式 (3.8) より光学的特性起因の波長シフト量 $\Delta\lambda_s$ を計算している. ここで, FBG①~⑧は初期波長 λ_0 のセンサ番号を示し, 測定波長 λ_1 が空白のものは波長未検出であることを意味している. したがって, 光結合機会 3 回目と 10 回目は全センサ波長未検出であり, 6 回目と 9 回目の 2 番目は, 中途から波長検出開始あるいは途中で波長検出終了を意味している. またデータ判定基準のカテゴリ Good は正常測定, Poor は不正常測定, Bad は非測定を意味し, その区分の詳細は表 3.4 に示している.

Table 3.4 Categories of measured FBG wavelength

Category	FC.1* ¹	FC.2* ²
Good	○	○
Poor	○	×
Bad	×	×

*¹FC.1 Filtering condition that all 8 of the FBG sensor is wavelength detection

*²FC.2 Filtering condition that $\Delta\lambda_s$ *³ is under a threshold 10 pm in all 8 of the FBG sensor

*³ $\Delta\lambda_s$ [pm] Peak shift of wavelength

Table 3.5 Summary of results

n_c	Number of optical coupling opportunity	10*
N_e	Number for data acquisition of category Good and Poor	8
N_1	Number for data acquisition of category Good	4
d_1 [%]	$= 100 \times (N_e/n_c)$ Data acquisition rate	80

*Extraction of the first 10 times during the all 31 times in the optical coupling opportunity

表 3.4 に示すフィルター条件や $\Delta\lambda_s$ のしきい値によるデータ分類方法は、前章、特に 3.2.3 で説明した考え方に基づいており、その妥当性は表 3.5 の分類結果から確認できる。そのため、次項以降に示す試験データの整理は、本例の分類方法を使用して行った。また表 2.5 の n_c は光結合機会数、 N_e はデータ取得回数、 N_1 は $\Delta\lambda_s$ がしきい値 10pm 以下となるデータ取得回数、 d_1 は実験のデータ取得率を示している。

(3) データ取得率

表 3.6 に示すように測定時間 ΔT が約 8 秒の条件で、計測器サンプリング周波数 n_s が 2 水準、回転速度 v_θ は 4 水準について、間欠的な空間光伝送性能確認のため回転試験を実施した。図 3.10 にデータ取得率に及ぼす回転速度の影響について、式 (3.1) による実験のデータ取得率 d_1 と式 (3.6) による計算値 d_2 と合わせて示す。式 (3.6) の計算条件として、 n_s は 2 水準 (0.65KHz, 1.25KHz)、有効光軸間距離 L_e は無負荷の回転試験なので基準光軸間

距離 L_0 の1.3mmとし、回転半径 r は回転軸中心とコリメータ中心間距離の77mm、波長掃引範囲 $\Delta\lambda_s$ はFBG センサ波長範囲の31nm、波長掃引速度 v_s は 430nm/msである。

Table 3.6 Test condition

Rotational speed		Measurement time ΔT [sec]	
R_c [rpm]	v_θ [m/sec]	n_s 0.65KHz	n_s 1.25KHz
100	0.81	9.0	7.3
200	1.61	8.0	7.7
400	3.23	8.3	8.0
800	6.45	-	8.0

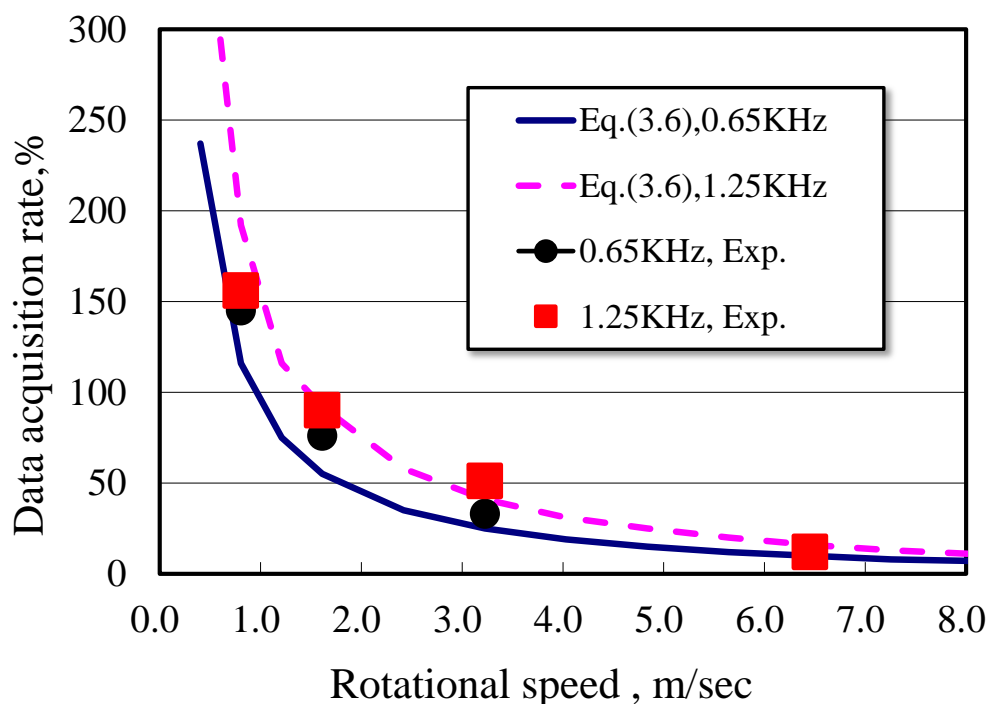


Fig. 3.10 Ability of optical space transmission

図 3.10 より次のことがわかる。

- 1) 試験結果と計算値は良く一致しており，式 (3.6) は間欠的な空間光伝送性能の予測に利用できる。
- 2) n_s が 1.25KHzの場合， v_θ が 6.5m/sec ($R_c = 800$ rpm) まで d_1 が 12%で測定できる。

図 3.10 で n_s が 1.25KHz の場合， v_θ が 1.6m/sec ($R_c = 200$ rpm) 以下の回転速度域でデータ取得率が 100%超となる理由は，有効光軸維持時間が相対的に長くなり一回の光結合機会に複数のデータ取得に成功するためである。

(4) データ取得回数，データ取得率と光学的特性起因の波長シフト

図 3.11 に，回転試験 (n_s が 1.25KHz の場合) において取得した測定データの精度に関し，光学的特性起因の波長シフトについて整理した結果を示す。

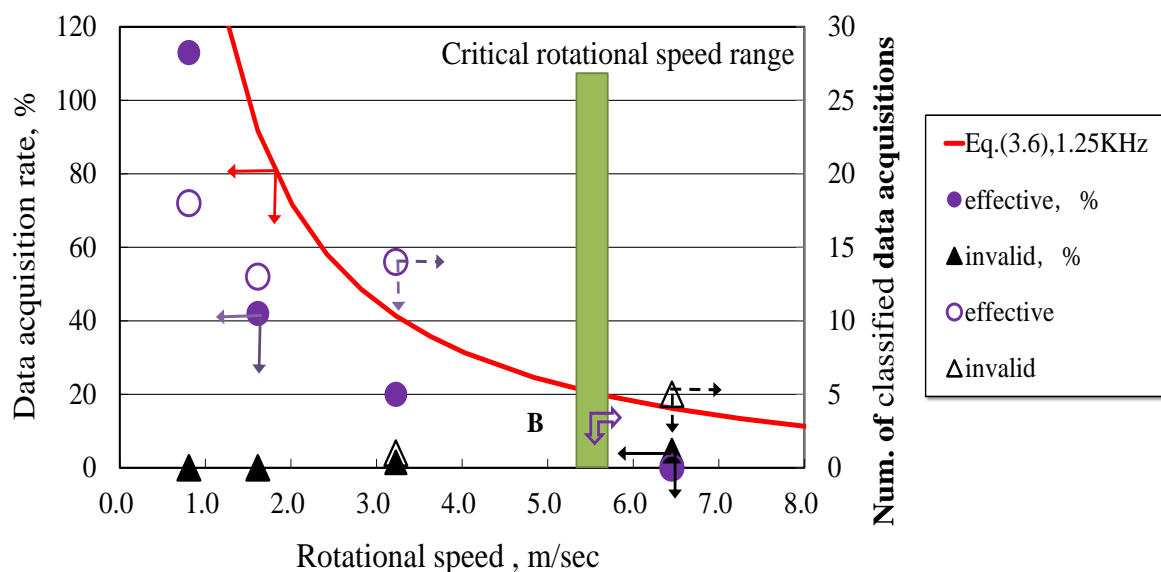


Fig. 3.11 Peak shift of wavelength due to optical properties

図では，式 (3.6) よりデータ取得率の計算値 d_2 ($n_s = 1.25$ KHz，図の左軸，実線)，回転速度 v_θ (軸回転数 R_c) ごと測定時間 ΔT 8 秒間における，データ取得回数 N_e の内数として，

式 (3.8) から求めた光学的特性起因の波長シフト量 $\Delta\lambda_s$ が 10pm 以下となるデータ取得回数 N_1 (図の右軸, ○点), 100pm 以上となるデータ取得回数 N_2 (図の右軸, △点), ならびに $\Delta\lambda_s$ が 10pm 以下となるデータ取得率 d_{11} ($d_{11} = 100 \times N_1/n_c$) (図の左軸, ●点), 100pm 以上となるデータ取得率 d_{12} ($d_{12} = 100 \times N_2/n_c$) (図の左軸, ▲点) を示している. ここで, n_c は光結合機会数で, データ取得回数とデータ取得できなかった回数の和である. 有効測定の可能条件が, $N_1 > N_2$ および測定データ平均化処理の必要性から $N_1 \geq 3\sim 4$ とすると, その限界は図に示す B(5.6, 4)付近と推定される. したがって測定精度が $v_\theta = 5.6\text{m/sec}$ 付近で悪化しており, 有効測定の限界域は $v_\theta = 5.6\text{m/sec}$ ($R_c = 700\text{rpm}$) 程度, また, 実験において有効測定できるデータ取得率の目安が 20%以上であることもわかる.

3.4 結言

回転軸モニタリングシステムとして, 光学的空間伝送装置を使用した回転試験を行い, 回転軸に装着された光ファイバからの情報を空間光伝送により取り出すことが可能であることを示した. さらにその間欠的な空間光伝送性能について評価した.

光学的空間伝送装置の静的試験では, BW. 径 0.3mm に対し, 基準光軸間距離は 1.3mm であり, 回転試験では回転速度が 6.5m/sec (軸回転数 800rpm) まで測定でき, 精度面からは 5.6m/sec (軸回転数 700rpm) 付近まで有効に測定できることがわかった. あわせて間欠的な空間光伝送性能の評価指標 (データ取得率, データ取得回数, 光学的特性起因の波長シフト) も性能予測に有効であることも確認できた. ただ実用に際しては各種の外乱環境への対応が要求されるので, その場合には性能向上施策が必要となる.

参考文献

- (1) 日下部佳子, 功刀竜介, 対馬和弘, <連載>EEDI<上>/海運・造船の何がかわるか, 日刊海事プレス, 9月28日(2011a), pp.4-5, 株式会社海事プレス社.
- (2) 日下部佳子, 功刀竜介, 対馬和弘, <連載>EEDI<中>/初の船舶省エネ認証, 第一歩は, 日刊海事プレス, 9月29日(2011b), pp.6-7, 株式会社海事プレス社.
- (3) 日下部佳子, 功刀竜介, 対馬和弘, <連載>EEDI<下>/指標が造船所をふるいにかける, 日刊海事プレス, 9月30日(2011c), pp.6-7, 株式会社海事プレス社.
- (4) 日刊海事プレス, MHI マリンエンジ, 無線式の光学軸馬力計を開発, 日刊海事プレス, 5月17日(2013), p.10, 株式会社海事プレス社.
- (5) 三上郁夫, 琉球海運の省エネ運航の取り組み, 日本船舶機関士協会,
<<http://www.marine-engineer.or.jp/images/2013ppt3.ppt>> (2013), pp.12-14,
(参照日 2014年5月28日).
- (6) 加納敏幸, 佐藤圭二, 実海域船舶性能データの Visual Mining Studio を用いたマイニング, 数理システム ユーザーコンファレンス (2012), pp.5-25.
- (7) 三田彰, スマート建築構造物と光ファイバセンサ, 第50回理論応用力学講演会講演論文集 (2001), pp.527-528.
- (8) 武田展雄, 構造ヘルスマニタリング技術の研究開発, 日本航空宇宙学会誌, Vol.52, No.605(2004), pp.142-148.
- (9) 斎藤崇記, 高精度 FBG センサモニタ, 電気学会計測研究会(2012), IM-12-041.

第 4 章 FBG センシングによる円筒 表面のねじりひずみ分布計測

4.1 緒言

光ファイバセンサは、ファイバがセンサと伝送路をかね伝送損失が極めて小さく、長距離測定が可能であり、信頼性が高く分布計測が可能である。そのために、構造物の長期間の安全性や信頼性確保を目的とする構造健全性モニタリングでの使用例が多い⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

洋上風力発電などエネルギー分野では、過酷な環境下で長期間稼動する構造物のメンテナンスに対し、遠隔地から運転状況を常時監視するモニタリングシステムのニーズが高く、光ファイバセンシングの主要な適用分野の一つである⁽⁴⁾⁽⁵⁾。また、設備には、常時過酷な運転荷重としてねじりをうける回転軸も多く含まれており、常時運転機器だけに、そのメンテナンスは重要である⁽⁶⁾。しかし、曲率の大きな曲面への、光ファイバセンサの取付け使用例は少ない。線センサである光ファイバセンサは、点センサである従来方式以上に曲率の影響をうけやすいと考えられる。特に、軸方向に角度をとって張線するねじりによるひずみ計測の場合には、測定精度に与える影響を把握しておく必要がある。また、互いに精度補完しあう複数のセンサの組合せも、ひずみ計測精度の向上には有効と思える。

本章では、円筒体表面のねじりによるひずみ分布の測定に FBG (Fiber Bragg Grating) 方式の光ファイバセンサを使用する場合の精度について考察した。精度向上について、大きな曲率の影響と互いに精度補完しあう複数センサの組合せに着目した。そのため、FBG センサの精度に影響を与える諸要因の確認試験を行ったうえで、円筒体に取り付けた FBG 光ファイバセンサの性能評価のためにねじり負荷試験を行った。円筒表面に発生するねじりひずみ分布や温度の測定結果をもとに、FEM 解析結果との比較を含め計測手法の有効性を評価した。

4.2 基礎試験

4.2.1 単軸引張試験

FBG センサのひずみ感度を確認するために単軸引張試験を行った。図 4.1 に、試験に使用した単軸引張試験機 (SHIMADZU AG-IS 100KN)、試験片 (JIS 1B, SS400, L200mm*W25mm*T6mm)、FBG センサ (Type C, Magnet rubber cover sheet, L200mm*W25mm*T2mm) を示す。

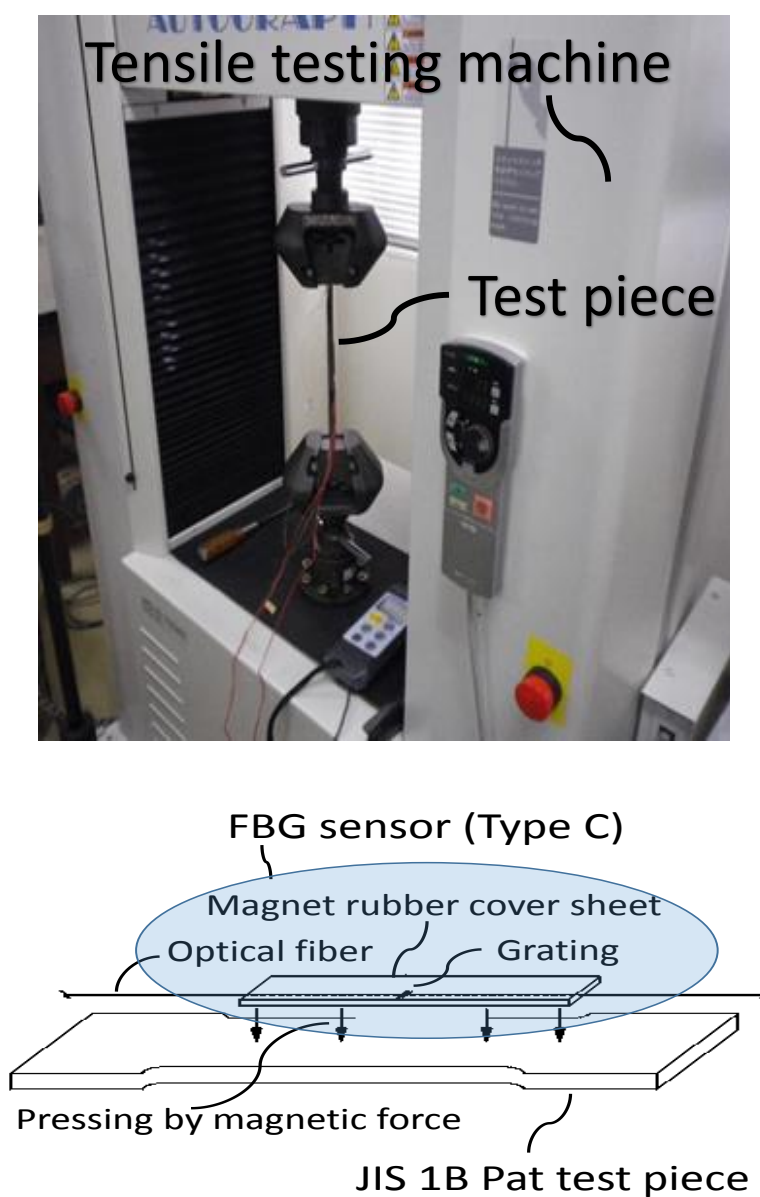


Fig.4.1 Testing machine and test piece

図 4.2 に、単軸引張試験結果を示す。縦軸に波長シフト量、横軸にひずみを示し、計算値は式 (2.2) を用いてひずみ感度が $1.2\text{pm}/\mu\epsilon$ の場合で、実験値は試験荷重から逆算したひずみに対する測定波長シフト量を示す。なお、逆算には試験片の断面積 150mm^2 と SS400 の縦弾性係数 206GPa を使用した。図から、FBG センサのひずみ感度は、一般的に使用される $1.2\text{pm}/\mu\epsilon$ とほぼ等しいことがわかる。また、試験に使用した FBG ひずみセンサは Type C のユニット型センサであるが、Type AC と Type BC のセンサとは対象物への固定法が異なるだけで、室温の範囲内でひずみ感度に差はないとされる。

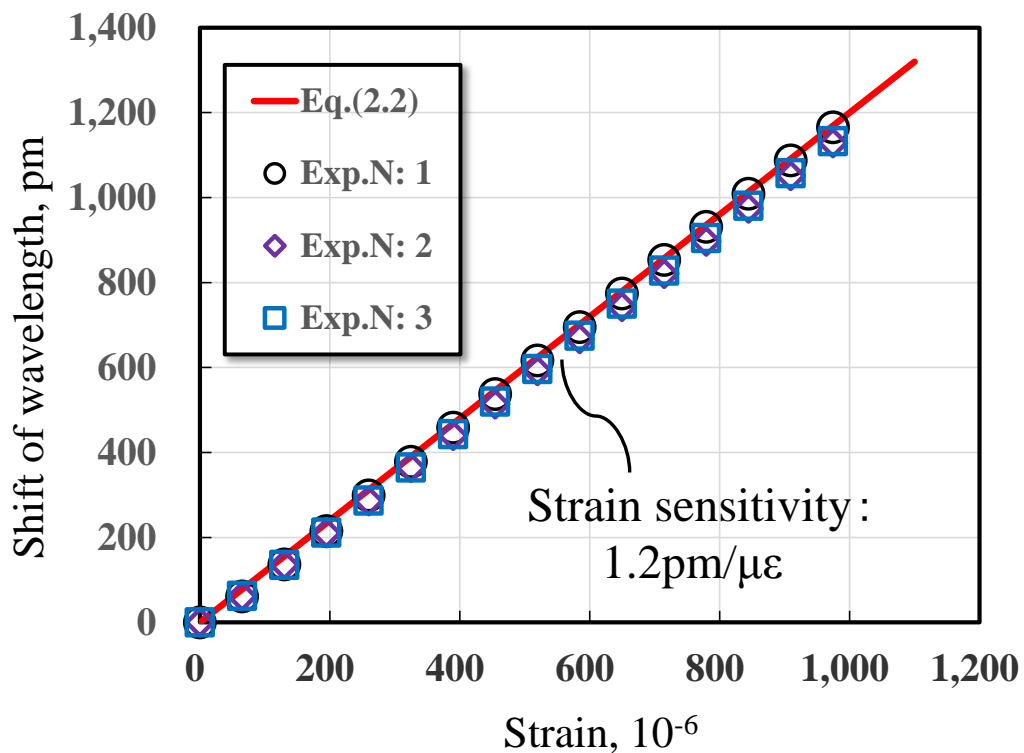


Fig.4.2 Strain sensitivity of FBG sensor

4.2.2 曲率の測定波長への影響確認試験

曲率が測定波長に与える影響を把握するため、曲率半径（曲げ径）を変えて光パワー損失と測定波長の変化を測定した。図 4.3 に試験装置の概要を示す。使用した計測器は横河電機製 FB200FBG センサモニタ、FBG センサの中心波長は 1542nm で素線のままで対象物に固定せず、無負荷の状態にて 2 回測定を行った。

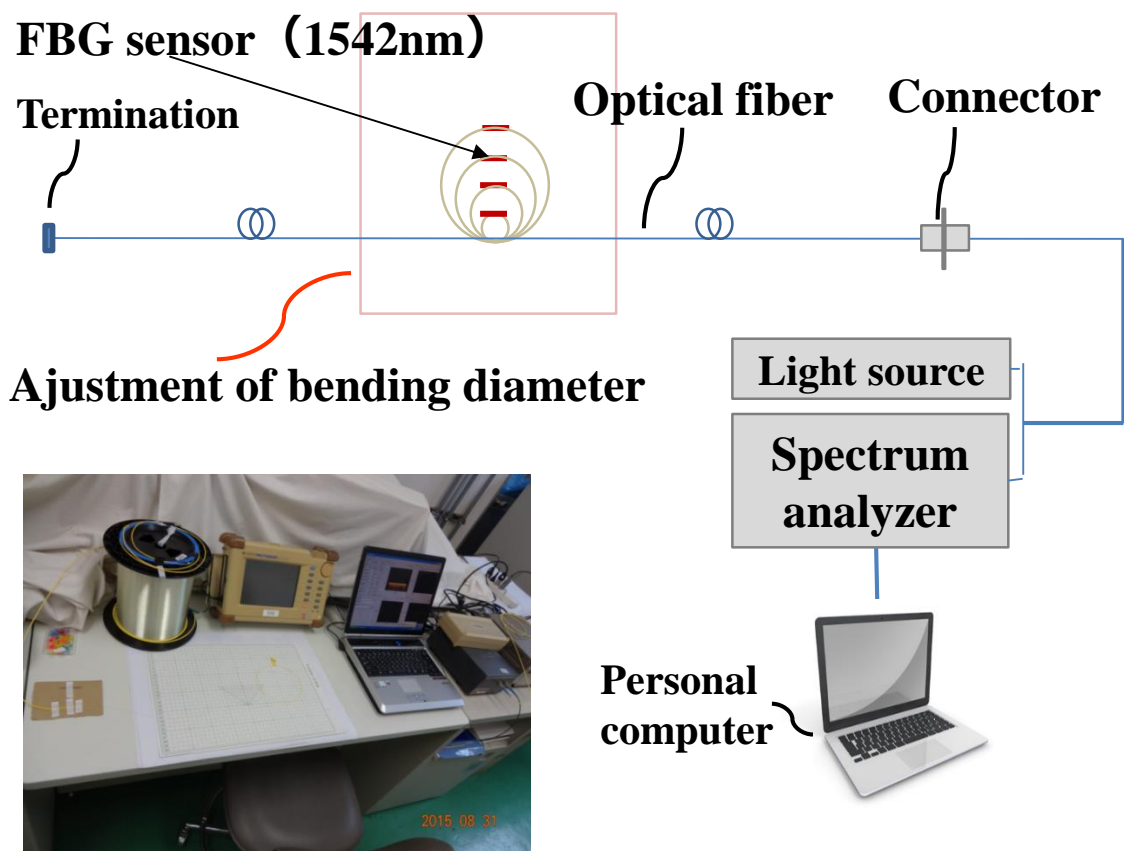


Fig.4.3 Overview of test apparatus

図 4.4 に、試験結果を示す。図 4.4 には、横軸に曲げ径，第 1 縦軸（図の左軸）は測定波長で，1 回目（●点），2 回目（■点）を示し，第 2 軸（図の右軸）は光パワー損失差（平坦な場合を基準）で，1 回目（○点），2 回目（□点）を示す。図から，測定波長が大きくシフトし始めるのは，曲げ径 20~30mm の領域で，その理由は，この領域で光パワー損失が急増し，パワースペクトラムからピーク波長を計算する誤差が大きくなっていることがわかる。したがって，曲げ径が 30mm より大きくなる場合は，測定波長に曲率（曲げ径）が与える影響は無視できる範囲にあると推定される。ただし，ピーク波長計算の平均化処理回数は 5 回，センサのピーク検出半値幅 0.2nm である。

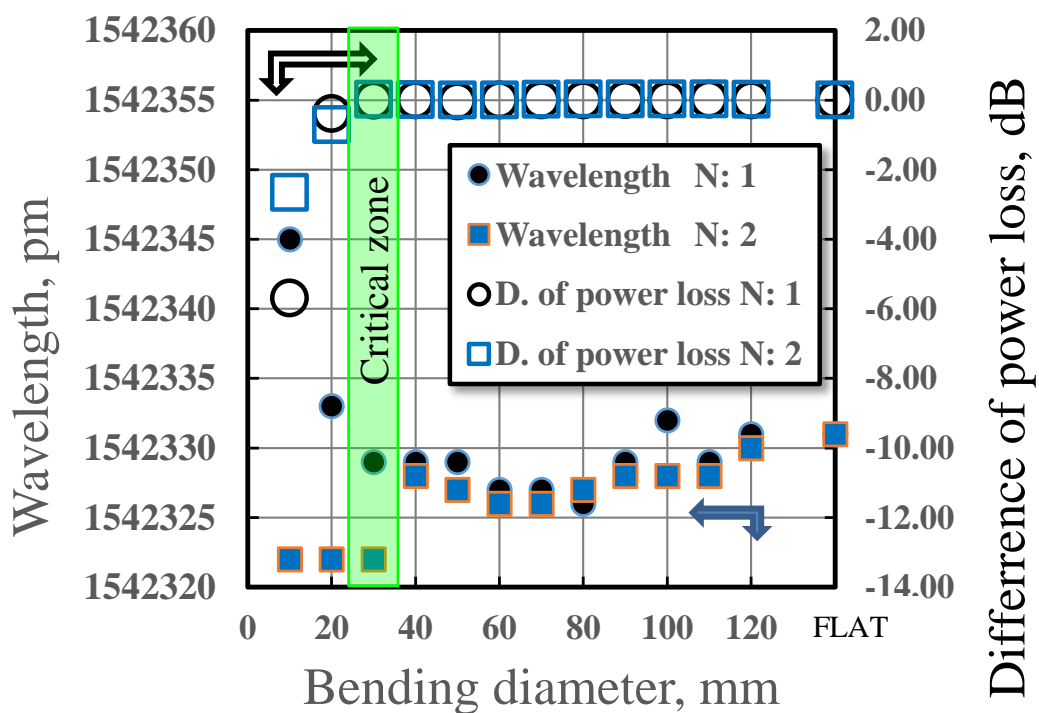


Fig 4.4 Shift of wavelength due to curvature

4.3 ねじり負荷試験

4.3.1 試験装置

(1) ねじり試験装置と試験体

ねじりによるひずみ測定では安定した測定を行うために、電氣的センシングでも2枚、4枚の複数ゲージを組み合わせて回路を構成したものが使用されている⁽⁷⁾。FBG センサでは、単独センサとなるので、電氣的センシングのように直接的に誤差を相殺できないが、センサの組合せにより間接的に誤差を相殺し、精度良く測定できるか、確認するためにねじり負荷試験を行った。図4.5は本研究で用いた円管のねじり負荷試験装置を示す。円管の一端を固定し、ギヤボックスの入力軸に取り付けた腕に荷重を加えて、ギヤボックスと円管の間のトルクメータで測定しながら円管にトルクを加えた。なお、円管およびトルクメータの継手はたわみ軸継ぎ手を用いた。試験体測定部の材質・寸法は配管用炭素鋼鋼管SGP100A（外径109.3 mm，長さ374 mm，肉厚2mm）で、端部は外径120 mmのフランジと鍛造による厚肉円筒構造で双方を溶接接合している。

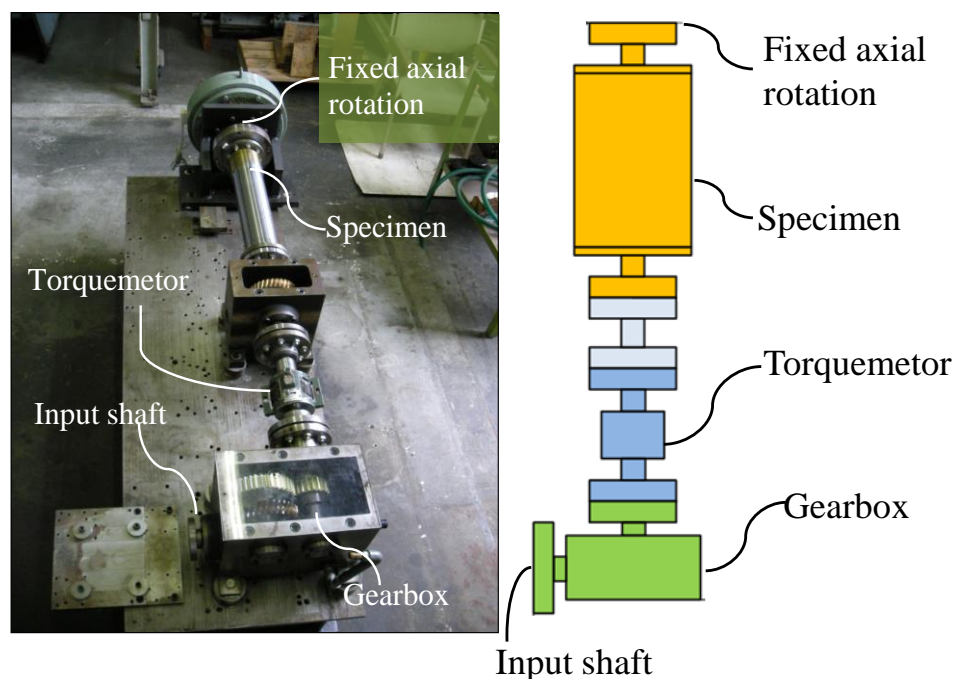


Fig. 4.5 Experimental apparatus

(2) FBG センサの取付け

図 4.6(a)は、本研究に使用したセンサ配置を示す。3 個の基本型ひずみセンサ⑥⑦⑧ (Type AC) を張線角度で -45° ，取付け位置は図の左側で，測定部長 $L=374$ の下端を基準として，同一周方向に各々 $L/6$ (P1)， $L/3$ (P2)， $L/2$ (P3) に取付けた。同様に，2 個のユニット型ひずみセンサ②① (Type BC) を張線角度で 45° ，取付け位置は図の右側で，下端を基準として，同一周方向に各々 $L/6$ (P1)， $L/2$ (P3) に取付けた。また，張線角度で 0° ，取付け位置は，測定部長 $L=374\text{mm}$ の上端 (P4) に軸ひずみ測定用ユニット型センサ③ (Type BC) を取付けた。張線角度 $\pm 45^\circ$ でひずみ感度は最大となり，張線角度 -45° で図の左側は圧縮，張線角度 $+45^\circ$ で図の右側は引張りのひずみ状態となる。FBG ひずみセンサでは，初期張力をかけた状態で対象物に固定し，圧縮の応力でも引張応力場で測定できるようにしてある。

温度測定用に FBG 温度センサと防滴デジタル温度計を使用した。防滴デジタル温度計 (CUSTOM 製 CT-450WR) のプローブは，図の上端 (P4) に接触させた。FBG 温度センサは，ひずみの影響の受け難い張線角度 0° で，位置は防滴デジタル温度計と同じ図の上端 (P4)，左側に基本型温度センサ⑤ (Type BT)，右側にユニット型温度センサ④ (Type UT) を取付けた。

6 個のひずみセンサの構造を図 4.6(b)を示す。ひずみセンサの寸法はグレーティング長 $l_1=10\text{mm}$ ，固定間隔 (フリー長) $l_2=30\text{mm}$ ，センサ部長 $l_3=100\text{mm}$ である。特性は半値幅 $0.22\sim 0.23\text{nm}$ ，反射率 90%，中央波長は各々 $3\sim 7\text{nm}$ 間隔をあけて $1533\text{nm}\sim 1560\text{nm}$ に分布しており FBG センサ波長範囲は 27nm となる。

また，マグネットシートの寸法は，取付け用 $L100\text{mm}\times W25\text{mm}\times T2\text{mm}$ ，カバー用 $L100\text{mm}\times W25\text{mm}\times T0.6\text{mm}$ である。

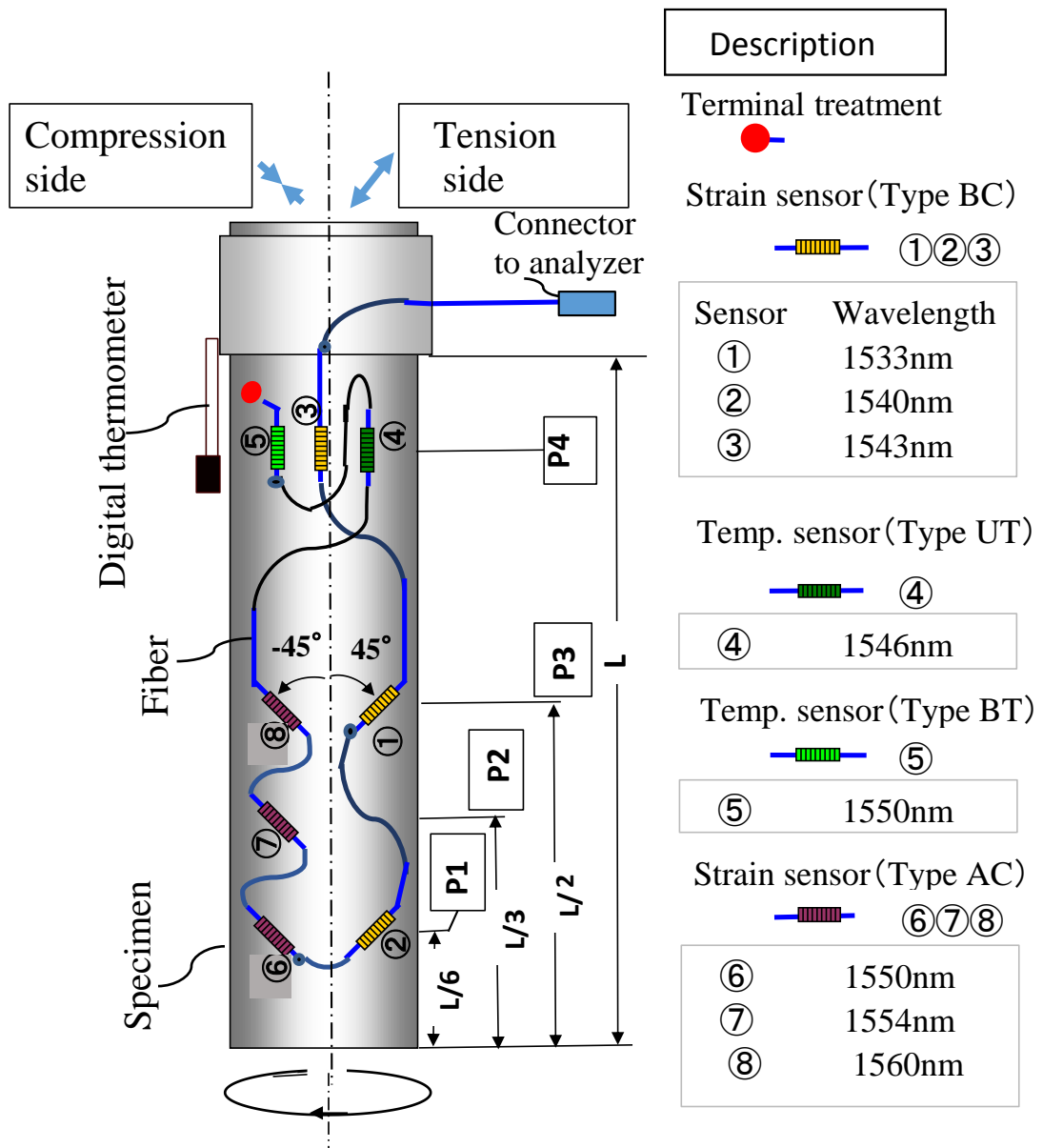


Fig. 4.6(a) FBG sensors on the specimen

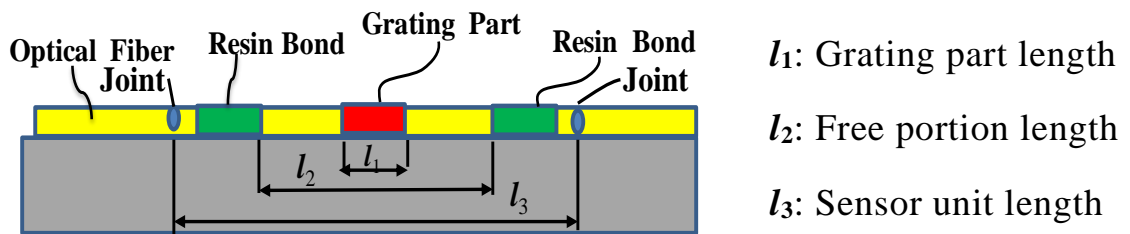


Fig. 4.6(b) Detail of FBG strain sensor

Fig. 4.6 FBG sensors

(3) 対センサの構成

表 4.2 は，測定精度を向上させるため，互いに誤差を相殺する複数センサを組合せた対センサの構成を示している。

対センサの基本的な考え方を次に説明する．測定ひずみは測定対象ひずみと測定対象外ひずみの和から構成される．ここで測定対象外ひずみは誤差と定義する．誤差を消去するのに，二つの方法があって，一つめが互いに直交するセンサを組み合わせることで誤差を消去するのが誤差相殺型（Cb1 と Cb3）である．二つめが互いに張線角度が異なる複数のセンサ（主と副）を組み合わせ，主センサで測定対象ひずみ，副センサで測定対象以外のひずみを測定し，互いの差をとることで，測定対象以外のひずみを誤差消去するのがひずみ直接相殺型（Cb2）である．対センサ Cb1 と Cb3 は，位置 P1 でセンサ②⑥，位置 P3 でセンサ①⑧のセンサを組合せた誤差相殺型である．一方，対センサ Cb2 は，位置 P2 のセンサ⑦と位置 P4 のセンサ③を組合せたひずみ直接相殺型である．

Table 4.2 Combination sensors

Comb. sensor	Normal sensor 1				Normal sensor 2			
	Sensor name	Mount position	Line angle	Sensor type	Sensor name	Mount position	Line angle	Sensor type
Cb1 ^{*1}	⑥	P1	-45°	AC	②	P1	45°	BC
Cb2 ^{*2}	⑦	P2	-45°	AC	③	P4	0°	BC
Cb3 ^{*1}	⑧	P3	-45°	AC	①	P3	45°	BC

*1Cb1,Cb3: Combination sensor of error cancellation type

*2Cb2: Combinaton sensor of strain direct cancellation type

4.3.2 試験結果

(1) 測定温度

ねじり負荷試験を行う際、同時に2回にわけて試験体温度を測定した。1回目試験の開始時室内温度は25.4℃、2回目試験の開始時室内温度は24.4℃であった。図4.7は、FBG基本型温度センサ（Type BT）の測定結果と防滴デジタル温度計による測定結果を比較して示す。縦軸はFBGセンサの測定波長、横軸はデジタル温度計の温度を示す。図では、1回目試験の測定値（●点）、2回目試験の測定値（○点）、測定値の線形近似直線（-実線）である。2回で温度差1.4℃の変動に対し波長差17pmとよく追従できており、基本型温度センサの温度感度は室温で12.2 pm/℃となり2・2・3での一般値とほぼ等しいことがわかる。また、図4.8には、FBGユニット型温度センサ（Type UT）の測定結果を示す。ユニット型温度センサの温度感度も同様に10.5 pm/℃となった。なお、ひずみセンサの波長変動分から温度センサの波長変動分を相殺することで、ひずみの温度補正を実施している。

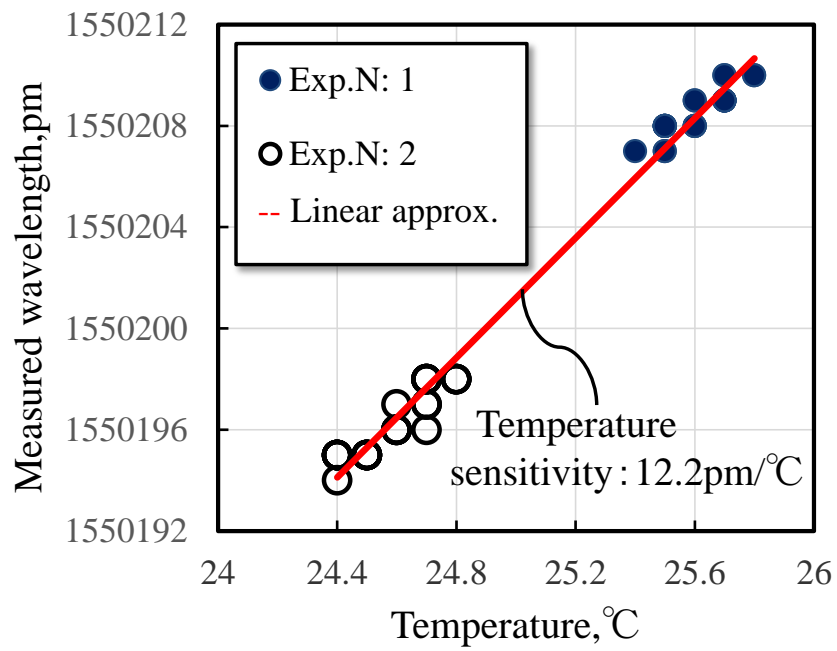


Fig. 4.7 Temperature sensitivity(Type BT)

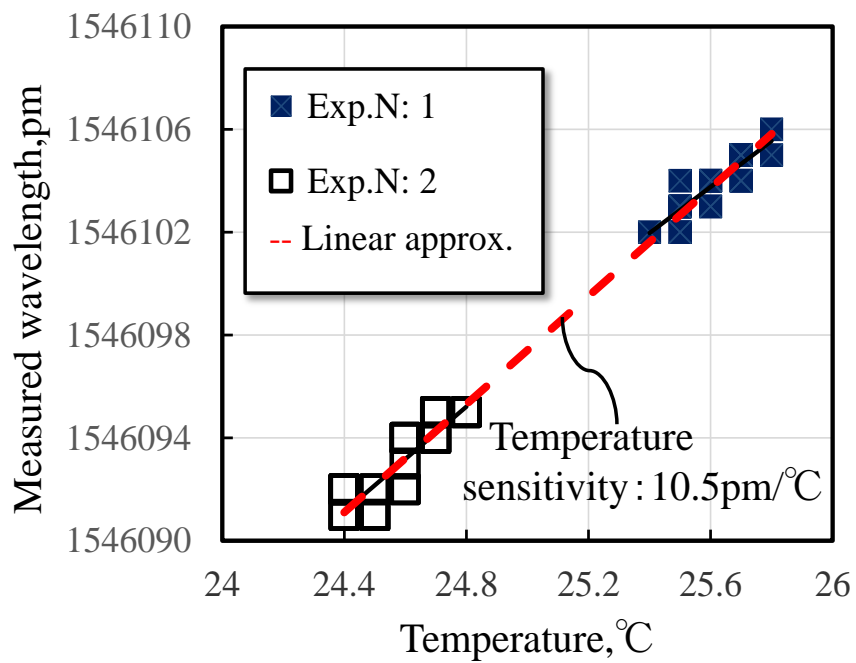


Fig. 4.8 Temperature sensitivity(Type UT)

(2) ねじりひずみ分布

実験結果と比較するために、一様な軸ねじりの場合の Saint-Venant 基礎式⁽⁸⁾を使用し、計算式 (4.1) を求めた。式 (4.1) の高次項を省略すると、一般的にひずみとトルクの関係式として使用される式 (4.2) が得られる。

$$\varepsilon = \cos \theta \sqrt{1 + \left(\tan \theta + \frac{r_s T_q}{GJ} \right)^2} - 1 \quad (4.1)$$

$$\varepsilon \approx \frac{r_s T_q}{2GJ} \sin 2\theta \quad (4.2)$$

ここで、 T_q はトルク(N・m)、 GJ は軸ねじり剛性(N・m²)、 r_s は軸半径(m)、 ε は測定ひずみ、 θ は周方向展開時の FBG センサの張線角度(°)、ただし $GJ = 1.44119 \times 10^5 \text{N} \cdot \text{m}^2$ 、 $r_s = 0.05465 \text{m}$ である。以下、式 (4.2) を使用して実験結果と比較を行う。

図 4.9 は、静止ねじり負荷試験の結果で、縦軸が波長シフト量、横軸がトルクとしてひずみセンサ①②③⑥⑦⑧について波長シフト測定値と式 (4.2) と (2.2) を用いた張線角度 45° の場合のトルクによる波長シフト計算値を示している。なお、トルクは約 $500 \text{ N}\cdot\text{m}$ まで負荷し、同じ試験を 3 回繰り返した。また、波長変動の基準となる初期波長は、1 測定開始無負荷時の波長としている。図より、理由は特定できていないけれども、③を除く全センサが計算値に対し+側にシフトする傾向を示す。センサ①②はほぼ同じ、③は小さく、⑥⑦⑧もまたほぼ同じであることがわかる。

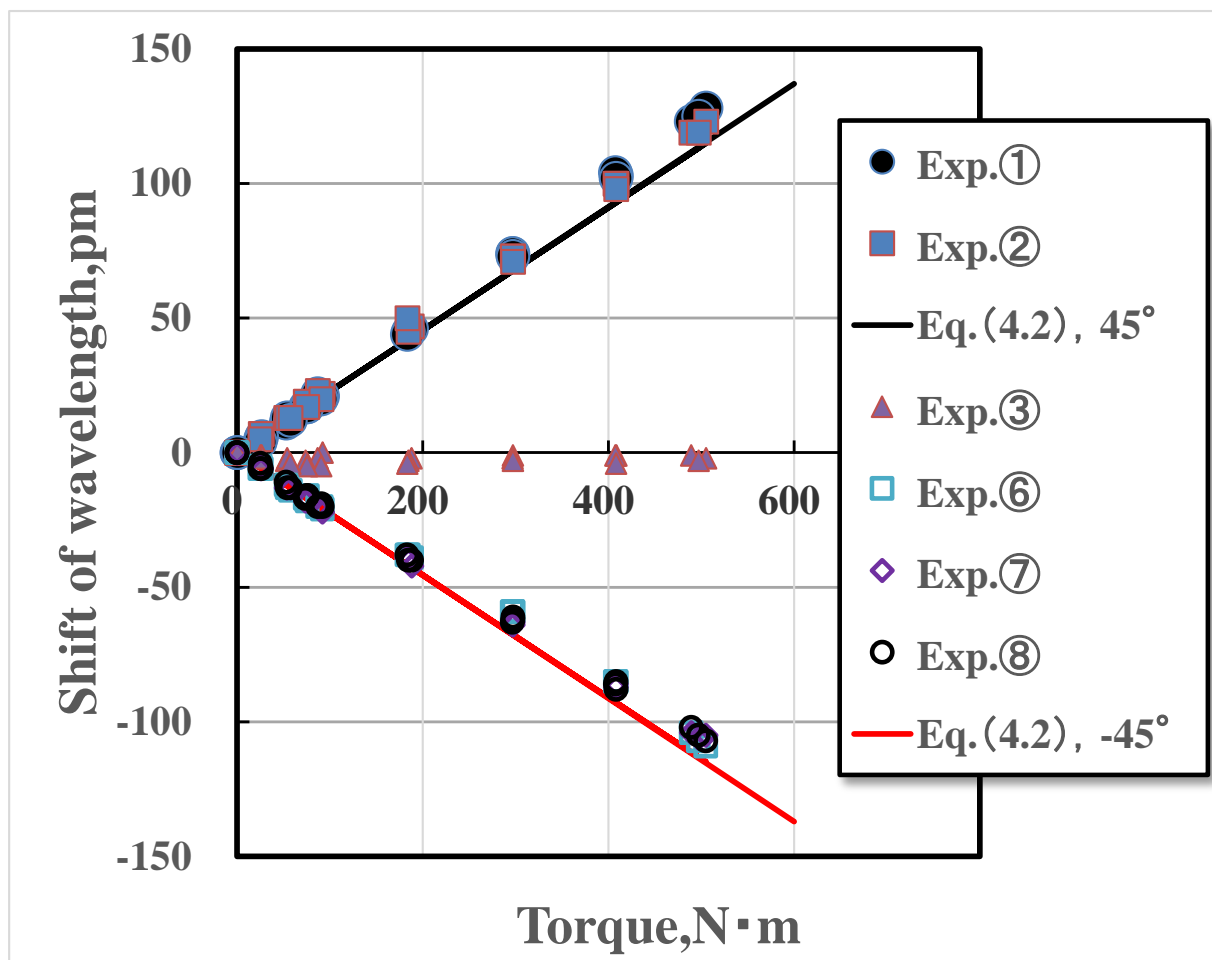


Fig. 4.9 Measured and calculated shift of wavelength

図 4.10 は、静止ねじり負荷試験の結果で、縦軸がひずみ、横軸がトルクとして対センサ Cb1～Cb3 のひずみ測定値と式 (4.2) で張線角度 45° の場合のトルクによるひずみ計算値を示している。図より、対センサの試験結果と計算値は差が小さく良く一致しており、対センサ Cb2 (ひずみ直接相殺型) は精度的にやや落ちるものの、Cb1 と Cb3 (誤差相殺型) は精度的に殆ど差がないことがわかる。また、センサ③の軸ひずみは小さいことから、Cb2 と Cb1, Cb3 との差が、対センサの効果と考えられる。したがって、センサの軸への取付け位置よりも対センサの組み方による影響の方が大きいと推定される。

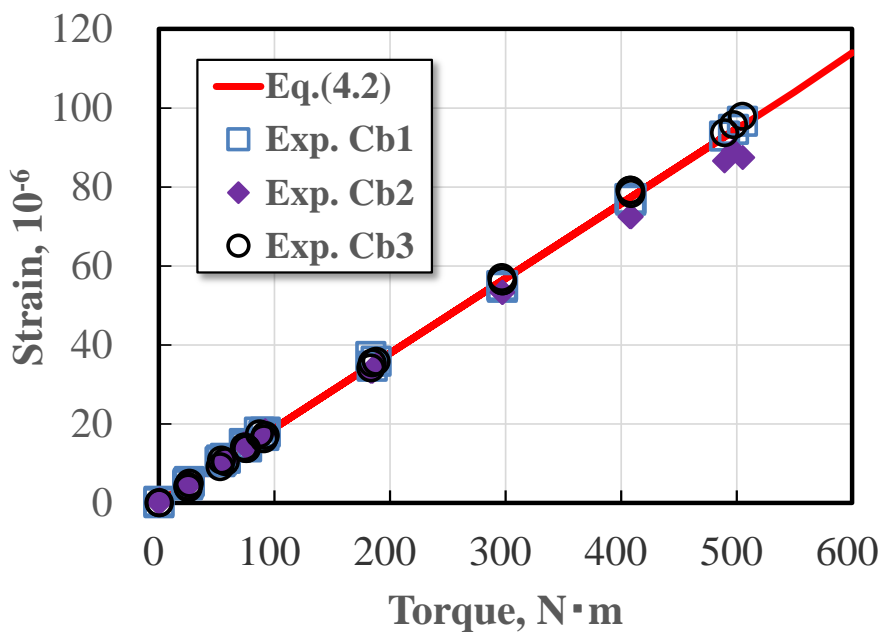


Fig.4.10 Measured and calculated strain
(Combination sensors)

4.4 FEM 解析

4.4.1 FEM 解析モデル

測定したひずみ分布の精度評価のため FEM 解析を実施した。特に，端部厚肉円筒構造が試験体測定部の軸方向ひずみに与える影響把握を目的としている。図 4.11 に解析モデルと結果のひずみコンタ図を示す。解析ソルバーは SolidWorks，要素は 4 面体 10 節点ソリッドを使用，解析モデルは薄肉側の肉厚 2 mm の試験体と対応させている。最小要素幅 2 mm，端部の回転を拘束し，もう片方にトルク 500 N・m を作用させた。測定部の最大ひずみは 95 $\mu\epsilon$ であり，式 (4.2) の計算値 94.8 $\mu\epsilon$ と一致している。また，端部の剛性差によって，境界部で局所的に大きなひずみ変化が発生していることがわかる。ただし，式 (4.2) の計算条件は， $T_q=500\text{N}\cdot\text{m}$ ， $\theta=45^\circ$ ， $GJ = 1.44119 \times 10^5\text{N}\cdot\text{m}^2$ ， $r_s = 0.05465\text{m}$ である。

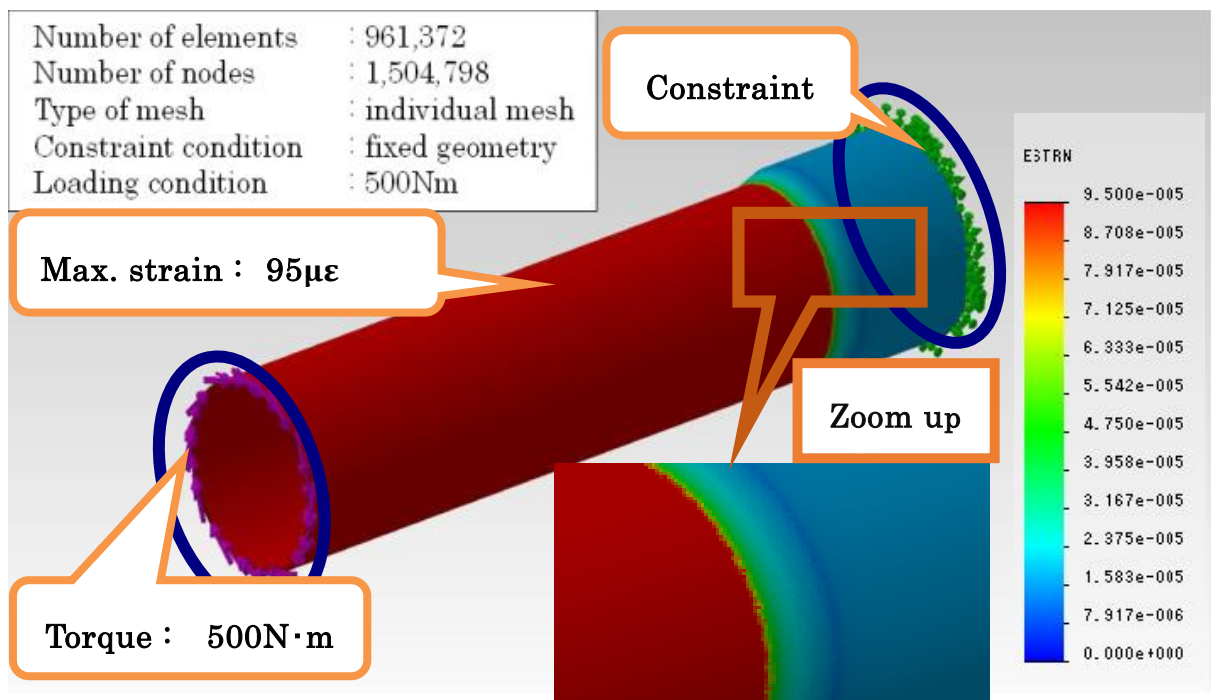


Fig.4.11 Strain contour

4.4.2 軸方向のひずみ分布（FEM 解析と試験結果との比較）

FEM 解析の結果およびねじり負荷試験の測定ひずみについて、各々のひずみ中央値で正規化した値の分布を比較した。図 4.12 にその結果を示す。FEM 解析の結果およびねじり負荷試験の測定ひずみについて、各々のひずみ中央値で正規化した値の分布を比較した。図 4.12 にその結果を示す。図の左側で、ユニット型センサ（Type BC）および基本型センサ（Type AC）について比較している。図から、FEM 解析結果ではひずみは一様で端部の剛性差によるひずみ変動領域は限られていること、また測定ひずみの軸方向差異は最大 4%程度であることがわかる。

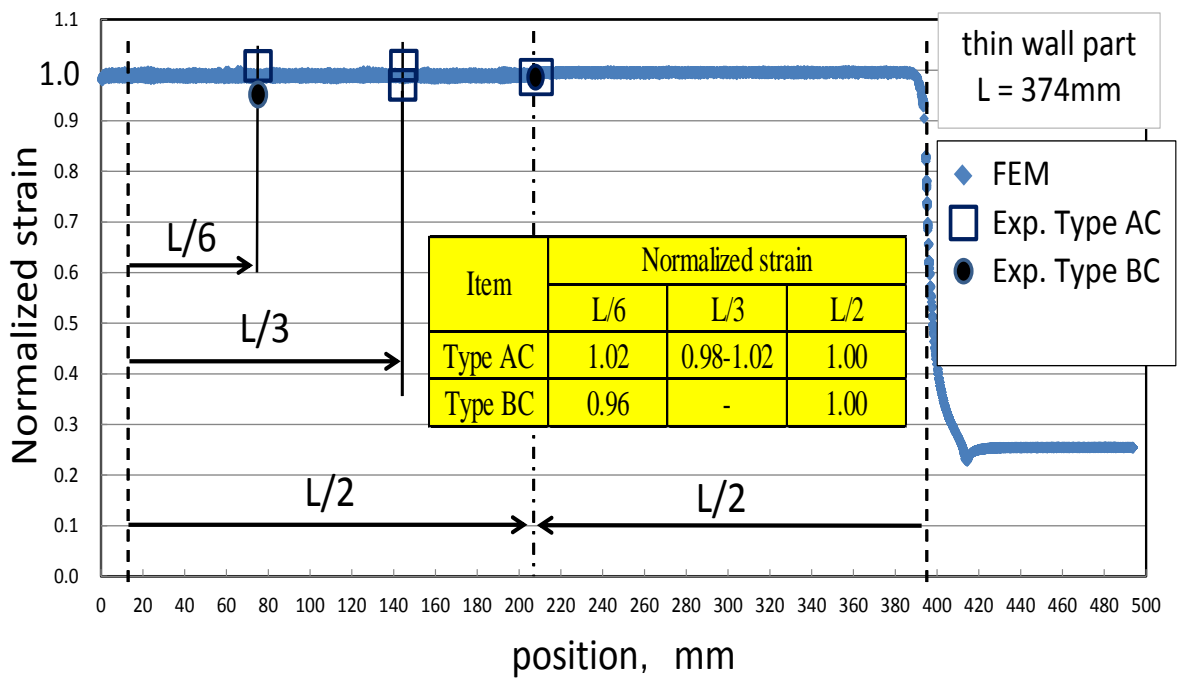


Fig. 4.12 Distribution of measured and FEM

4.5 考察

4.5.1 計測精度の評価

FEM 解析結果と測定ひずみの比較から、軸方向に定性的に必要な精度でひずみ分布測定できていることがわかる。ここでは、通常センサ、対センサについて定量的に誤差評価を行い、対センサによる改善効果を確認する。

表 4.3 に、ねじり負荷試験で測定されたひずみ誤差について、比較のため、図 4.9 と図 4.10 をもとに二乗平均誤差として計算した結果を示す。表から、図 4.9 で定性的に確認された通り、センサ①②の精度がほぼ等しく、⑥⑦⑧で⑦の精度がやや良いこと、また、図 4.10 で確認された通り Cb1 と Cb3 はほぼ等しく、Cb2 の精度がやや劣ることが定量的にわかる。特に、ねじり負荷試験結果として対センサの精度改善効果は 4~5%であることがわかる。

Table 4.3 Difference of strain error(%) between normal sensor
and combination sensor

Item	①	②	⑥	⑦	⑧	Ave.	Cb1.	Cb2.	Cb3.	Ave.
N: 1	8.7	8.6	8.6	5.9	10.4	8.4	1.8	5.1	2.5	3.1
N: 2	8.8	8.8	7.8	5.9	5.5	7.3	3.6	5.7	2.4	3.9
N: 3	9.3	9.2	8.5	7.5	10.7	9.0	3.2	5.3	2.5	3.6
Ave.	8.9	8.9	8.3	6.4	8.1	8.1	3.0	5.4	2.5	3.6

4.5.2 FBG センシングの対センサによる精度向上

表 4.3 から、通常センサ単独に比べ、対センサは平均で誤差 4~5%、精度 96.4%に改善される。Cb3 を例にすると、センサ①⑧で平均で誤差 8.5%、精度 91.5%であったものが、対センサ Cb3 では誤差 2.5%、精度 97.5%となり、6%精度が改善されている。図 4.9 より、センサ①②と⑥⑦⑧では、同じ様に+側にシフトするがシフト量に差がみられ、これが誤差相殺型対センサにおいて、誤差相殺されると同時にその差が残存誤差となる理由であることがわかる。このように、組合せることで相互に精度補完できる対センサとして誤差の縮小が可能となる。対センサを使用する場合には、軸方向・周方向の配置ならびに張線角度を目的に応じて選択することも重要である。また、今回は室内での短期試験のため温度の影響は小さかったが、長期モニタリングの場合には実際の使用環境を考慮した温度補正方法も必要となる。

4.5.3 曲率起因の波長シフト

式 (2.1) からわかる通り FBG 反射波長はグレーティング間隔や屈折率の変化の影響を受ける。したがって回転軸特有の問題として、軸の大きな曲率が与える反射波長への影響（曲率起因の波長シフト）について考察する。

曲率起因の波長シフトの要因は、物理的要因によるものと光学的要因に大別され、さらに光学的要因は、光ファイバ固有のものと FBG センサ固有のものに区分されるが、各々、現象と対策も異なる。

物理的要因によるものは、センサが平坦面から曲面に取付けられるので、センサに幾何学的な伸びが発生する。伸びはひずみを発生するので波長がシフトするが、測定対象とならないので初期波長をリセットする。

光ファイバ固有の光学的要因によるものは、ファイバの曲りによる光漏洩、光パワー損失の増加として現れ、結果としてパワー低下によるピーク波長検出誤差が増大し、誤差に

よる波長シフトとなる。この波長シフトは、4.2の試験結果からわかる通り、曲げ径 30mm 以上であれば実用上は影響を無視できる。

FBG センサ固有の光学的要因によるものは、曲率がグレーティング間隔や屈折率を変化させることで生じる波長シフトである。光弾性係数を変化させるので、式 (2.2), (2.3) から FBG センサのひずみ感度へ影響すると推定される。断定はできないが、負荷をうける場合や極大の曲率の場合には、影響をうける可能性はある。

今回のねじり負荷試験では、試験体の径が約 110mm であるので、4.2.2 の試験結果をふまえ、光学的要因による曲率起因の波長シフトの影響は無視している。

4.6 結言

FBG センサの精度に影響を与える諸要因の確認試験を行ったうえで、円筒体に取り付けた FBG 光ファイバセンサの性能評価のために静止ねじり負荷試験を行った。円筒表面に発生するねじりひずみ分布や温度の測定結果をもとに、FEM 解析結果との比較を含め精度を評価した。その結果、FBG センサの張線角度・施工法・センサ種別を選択し、互いに精度補完する複数センサを組合せて対センサとすることなどで通常センサ単独に比較して 4~5% 誤差を削減し、精度は平均 96.4% で測定できている。こうして回転軸の健全性判断に必要なひずみ分布を測定でき、あわせて温度、トルクなども計測可能なことがわかった。また、曲率が光ファイバセンサの波長シフトに与える光学的影響は、曲げ径 30mm 以上の円筒体ならば無視できることもわかった。

参考文献

- (1) Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., Shunk, D. D., Stinemates, D. W. and Nadler, B. R., A review of structural health monitoring literature: 1996-2001, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS, 2003.
- (2) 武田展雄, 構造ヘルスマニタリング技術の研究開発, 日本航空宇宙学会誌, 第 52 卷, 第 605 号(2004), pp.142-148.
- (3) Ye, X. W., Su, Y. H. and Han, J. P., Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: a comprehensive review, The Scientific World Journal, Vol. 2014, Article ID 652329(11pp), doi:10.1155/2014/652329.
- (4) Bosselmann, T., Willsch, M. and Ecke, W., The rising demand for energy: a potential for optical fiber sensors in the monitoring sector, Proc. of SPIE Vol.6933, 69330G(8pp), (2008), doi:10.1177/12.780718.
- (5) Schroeder, K., Ecke, W., Apitz, J., Lembke, E. and Lenschow, G., A fibre Bragg grating sensor system monitors operational load in a wind turbine rotor blade, Meas. Sci. Technol. 17(2006)1167-1172, doi:10.1088/0957-0233/17/5/S39.
- (6) Elnady, M. E., Sinha, J. K. and Oyadiji, S. O., Identification of critical speeds of rotating machines using on-shaft wireless vibration measurement, 25th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering, Journal of Physics: Conference Series 364(2012)012142, doi:10.1088/1742-6596/364/1/012142.
- (7) 渡辺理, ひずみゲージとその応用 (1982), pp.63-77, 株式会社日刊工業新聞社.
- (8) 鵜戸口英善, 川田雄一, 倉西正嗣, 材料力学 上巻(1957), pp.96-104, 裳華房.

第 5 章 FBG センシングによる回転軸 表面のねじりひずみ分布計測

5.1 緒言

構造健全性モニタリングは、構造システムの安全性や信頼性を確保する目的のために用いられている。使用されるセンサには多種あるが、一般的には光ファイバセンサが、伝送損失が極めて小さく、長距離測定が可能であり、信頼性が高く分布計測が可能であるために多く用いられている⁽¹⁾⁽²⁾。

洋上風力発電設備などではモニタリングの必要性は高く、また船舶分野においては、国際海運におけるエネルギー規制ならびに船舶の燃費改善が必要とされており、そのためには、航行中の船舶の正確な軸馬力計測を行うことが重要とされている⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

ファイバセンサを軸馬力測定へ適用するためには、回転軸の外周から空間光伝送によって測定データを取り出すことが必要である。これにより、航行中の船舶に取り付けて軸馬力を測定できる。また、ロータリコネクタなどの装置が不要となるため、従来の方法と比べコスト削減とメンテナンス性の向上を同時に実現することができる。著者ら⁽⁷⁾は、FBG(Fiber Bragg Grating)方式の光ファイバセンサを使用した回転軸モニタリングシステムを提案し、回転試験によりそのシステムの評価を行った。その結果、精度面から軸回転数が 700 rpm（回転速度が 5.6m/sec）まで有効測定でき、あわせて空間光伝送の評価指標が性能予測に有効であることを報告した。

本章では、FBG 方式の光ファイバセンサを船舶の軸馬力計として使用するために、実際に回転軸にトルクを加えたねじり試験を行い、発生する回転軸表面のひずみ分布や温度を測定した。3 章や 4 章の結果をふまえ、回転ねじり負荷による空間光伝送性能や FBG センシングの測定精度への影響を考察し、目標とする近海航路船への適用について評価した。

5.2 静止ねじり負荷試験

5.2.1 試験装置

ねじりによるひずみ測定では安定した測定を行うために，電氣的センシングでも2枚，4枚の複数ゲージを組み合わせて回路を構成したものが使用されている⁽⁸⁾。FBG センサでは，単独センサとなるので，電氣的センシングのように直接的に誤差を相殺できないが，センサの組み合わせにより間接的に誤差を相殺できるかどうかを確認するために静止ねじり負荷試験を行った。4.3.1 と内容が重なるので以下要点のみを記す。

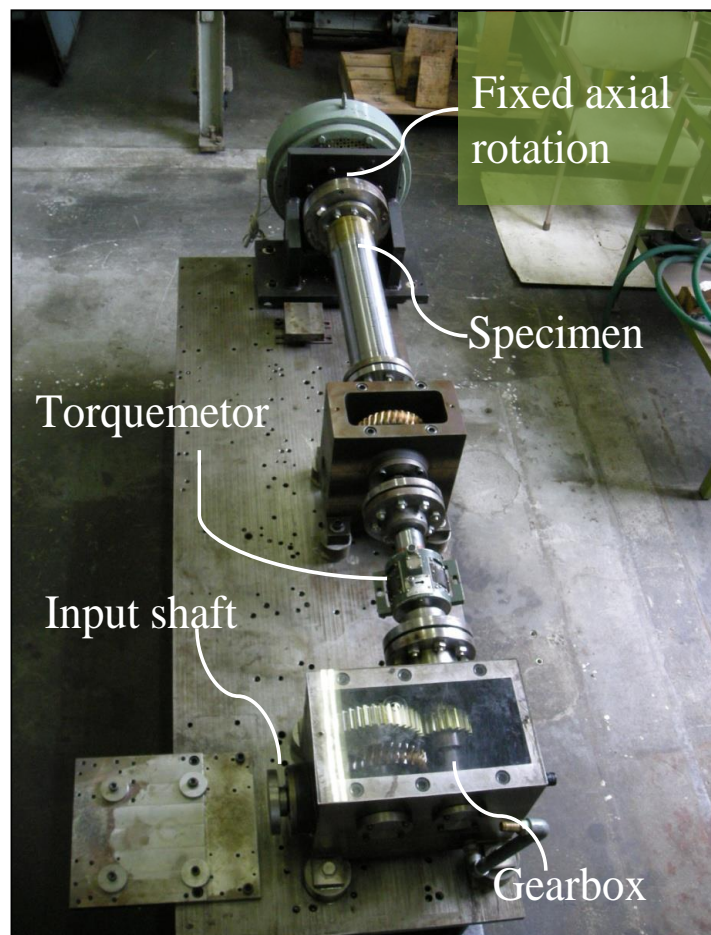


Fig. 5.1 Experimental apparatus for static torsional

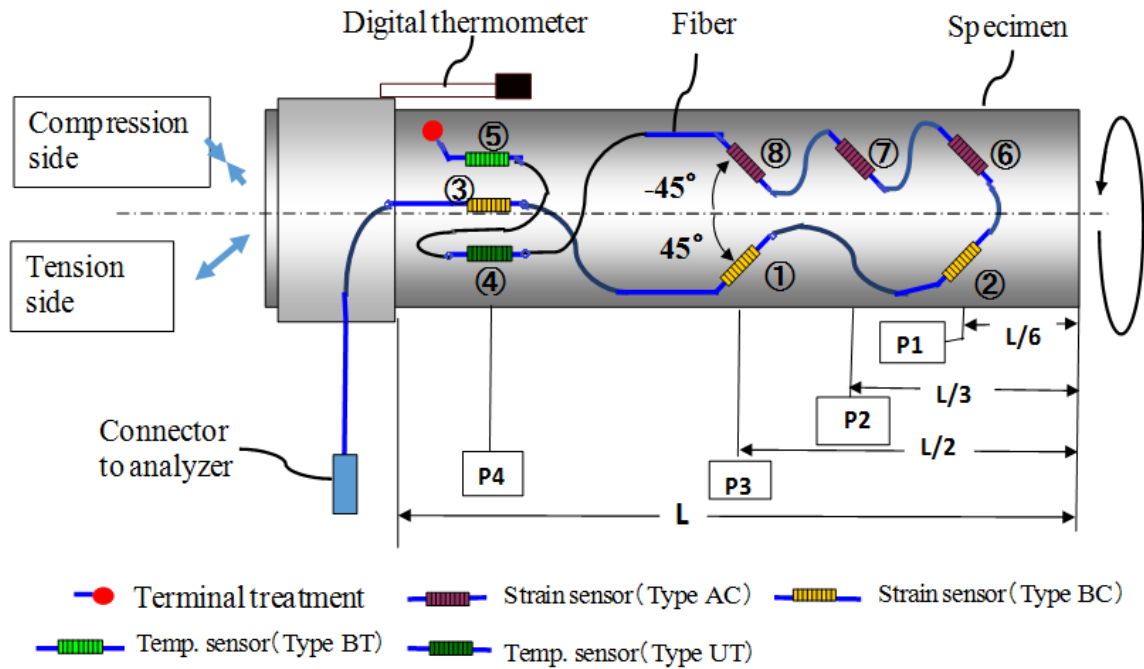


Fig. 5.2 FBG sensors on the test specimen (static torsional test)

Table 5.1 Summary of FBG sensors

(a) Installed FBG sensors

No.	Initial wavelength	Mount position	Line angle	Sensor type
①	1533nm	P3	45°	BC
②	1540nm	P1	45°	BC
③	1543nm	P4	0°	BC
④	1546nm	P4	0°	UT
⑤	1550nm	P4	0°	BT
⑥	1550nm	P1	-45°	AC
⑦	1554nm	P2	-45°	AC
⑧	1560nm	P3	-45°	AC

(b) Combination of sensors

Name	Mount position	Sensor	
		1	2
Cb1 ^{*1}	P1	⑥	②
Cb2 ^{*2}	P2, P4	⑦	③
Cb3 ^{*1}	P3	⑧	①

^{*1}Cb1, Cb3: Error cancellation type combination sensor

^{*2}Cb2: Strain direct cancellation type combination sensor

(1) ねじり試験装置と試験体

図 5.1 は本研究で用いた円管の静止ねじり負荷試験装置を示す。試験体測定部の材質・寸法は配管用炭素鋼鋼管 SGP100A（外径 109.3 mm，長さ 374 mm，肉厚 2mm）で，端部は外径 120 mm（光空間伝送用治具寸法にあわせて）のフランジと鍛造による厚肉円筒構造で双方を溶接接合している。円管およびトルクメータの継手はたわみ軸継手を用いた。

(2) FBG ひずみセンサの取付け

表 5.1(a)と図 5.2 は，本研究に使用したセンサ詳細とセンサ配置を示す。3 個の基本型ひずみセンサ⑥⑦⑧（Type AC）を張線角度で -45° ，取付け位置は図の上側で，測定部長 $L=374\text{mm}$ の右端を基準として，同一周方向に各々 $L/6$ （P1）， $L/3$ （P2）， $L/2$ （P3）の位置に取付けた。同様に，2 個のユニット型ひずみセンサ②①（Type BC）を張線角度で 45° ，取付け位置は図の下側で，右端を基準として，同一周方向に各々 $L/6$ （P1）， $L/2$ （P3）の位置に取付けた。また，張線角度で 0° ，取付け位置は，測定部長 $L=374\text{ mm}$ の左端（P4）に軸ひずみ測定用ユニット型センサ③（Type BC）を取付けた。

(3) 対センサの構成

表 5.1(b)は，測定精度を向上させるため，互いに誤差を相殺する複数センサを組み合わせた対センサを示す。対センサ Cb1 と Cb3 は，位置 P1 でセンサ②⑥，位置 P3 でセンサ①⑧，互いに直交するセンサを組み合わせた誤差相殺型（±の差をとり誤差相殺した後，平均処理し絶対値表示），一方，対センサ Cb2 は，位置 P2 のセンサ⑦と位置 P4 のセンサ③を組み合わせる，ひずみ直接相殺型（直接差をとり，絶対値表示）である。

(4) FBG 温度センサ

温度測定用に FBG 温度センサと防滴デジタル温度計を使用した。防滴デジタル温度計 (CUSTOM 製 CT-450WR) のプローブは、図の左端 (P4) に接触させた。FBG 温度センサは、ひずみの影響の受け難い張線角度 0° で、位置は防滴デジタル温度計と同じ図の左端 (P4)、上側に基本型温度センサ⑤ (Type BT)、下側にユニット型温度センサ④ (Type UT) を取付けた。また、FBG 温度センサはひずみの影響をうけないように、据付け時に初期張力をかけない、およびケーブルに余裕を持たせて緩く対象物に取り付けるなど配慮されている。

5.2.2 温度測定

静止ねじり負荷試験を行う際、同時に2回にわけて試験体温度を測定した。1回目試験の開始時室内温度は25.4°C、2回目試験の開始時室内温度は24.4°Cであった。図5.3は、FBG温度センサ (Type UT) の測定結果と防滴デジタル温度計による測定結果を比較して示す。縦軸はFBGセンサの測定波長、横軸はデジタル温度計の温度を示す。図では、1回目試験の測定値 (●点)、2回目試験の測定値 (□点)、測定値の線形近似直線 (—実線) である。2回で温度差1.4°Cの変動に対し波長差15pmとよく追従できており、温度感度は室温で10.5 pm/°Cとなり2・2での一般値とほぼ等しいことがわかる。また、図には示さないが、FBG温度センサ (Type BT) の温度感度も同様に12.2 pm/°Cとなった。なお、ひずみセンサの波長変動分から温度センサの波長変動分により、ひずみの温度補正を実施している。

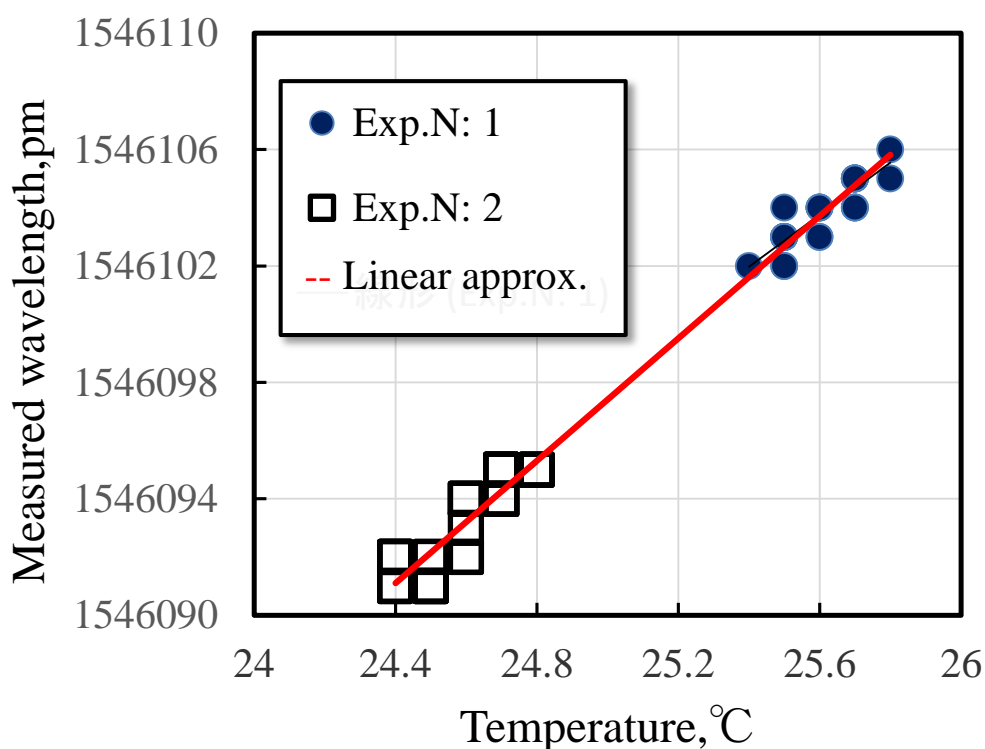


Fig. 5.3 Relationship between temperature and measured wavelength

5.2.3 静止ねじり負荷試験結果

4.3.2 試験結果と内容が重なるので要点のみ記す。図 5.4 は、静止ねじり負荷試験の結果で、縦軸がひずみ、横軸がトルクとして対センサ Cb1～Cb3 のひずみ測定値と式 (5.1) で張線角度 45° の場合のトルクによるひずみ計算値を示している。なお、トルクは約 $500 \text{ N}\cdot\text{m}$ まで負荷し、同じ試験を 3 回繰り返した。また、波長変動の基準となる初期波長は、1 測定開始無負荷時の波長としている。

図より、対センサの試験結果と計算値は差が小さく良く一致しており、ひずみ相殺型対センサ Cb2 は精度的にやや落ちるものの、誤差相殺型対センサ Cb1 と Cb3 は精度的に殆ど差がないことがわかる。また、センサ③の軸ひずみは小さいことから、Cb2 と Cb1、Cb3 との差が、対センサの効果と考えられる。したがって、センサの軸への取付け位置よりも対センサの組み方による影響の方が大きいと推定される。

実験結果と比較するための式 (5.1) は、一様な軸ねじりの場合の Saint-Venant 基礎式⁹⁾ を使用して求めた。ここで、 T_q はトルク (Nm)、 GJ は軸ねじり剛性 ($\text{N}\cdot\text{m}^2$)、 r_s は軸半径 (m)、 ε は測定ひずみ、 θ は周方向展開時の FBG センサの張線角度 ($^\circ$)、ただし $GJ = 1.44119 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}^2$ 、 $r_s = 0.05465 \text{ m}$ である。

$$\varepsilon = \cos \theta \sqrt{1 + \left(\tan \theta + \frac{r_s T_q}{GJ} \right)^2} - 1 \quad (5.1)$$

$$\varepsilon \approx \frac{r_s T_q}{2GJ} \sin 2\theta \quad (5.2)$$

式 (5.1) の高次項を省略すると、一般的にひずみとトルクの関係式として使用される式 (5.2) が得られる。

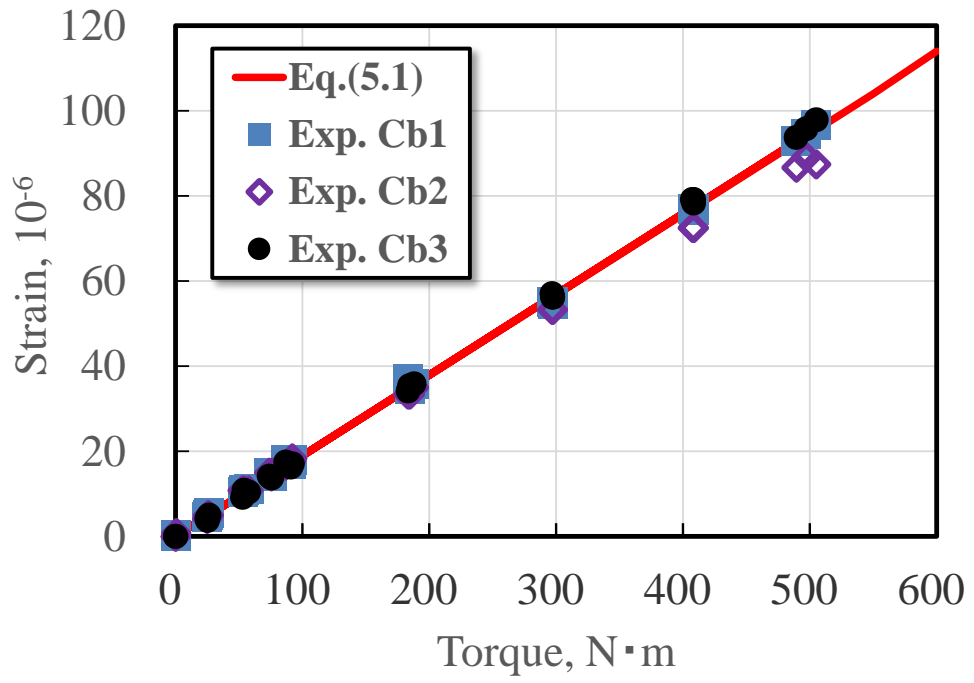


Fig. 5.4 Relationship between torsional loading and strain

5.3 回転試験装置によるねじり負荷試験

5.3.1 回転試験装置

図 5.5 は回転ねじり負荷試験の試験装置全体，図 5.6 に試験装置の概要を示す．図 5.1 の静止ねじり負荷試験装置に駆動用モータを取り付けることによって，動力は，モータ，ギヤボックス，トルクメータ，試験体，パウダーブレーキの順に伝達される．なお，トルクはパウダーブレーキの励磁電圧を調整することによって変化させることができる．図 5.7 に計測システム全体，表 5.2 に計測システムの仕様を示すが，試験体およびセンサ・センサの配置は図 5.3 と表 5.1 に示すものと同一のものを用いた．また図に示す計測器は，表 4.3 のアンリツデバイス製 AR4011A FBG センサモニタであり，シングルモード波長掃引光源と対数アンプによる増幅機能付受光器からなる．

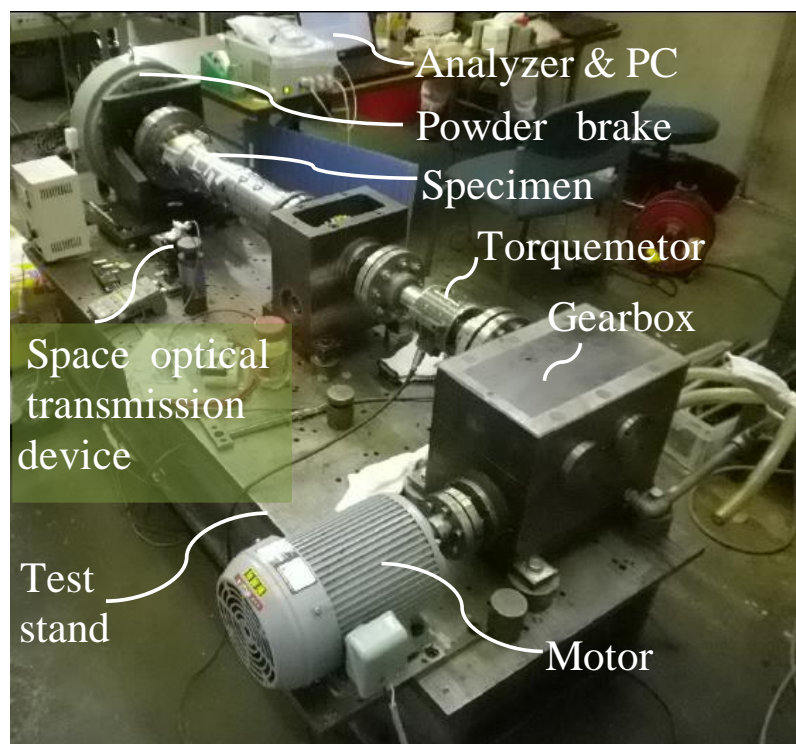


Fig.5.5 Experimental apparatus for rotational loading

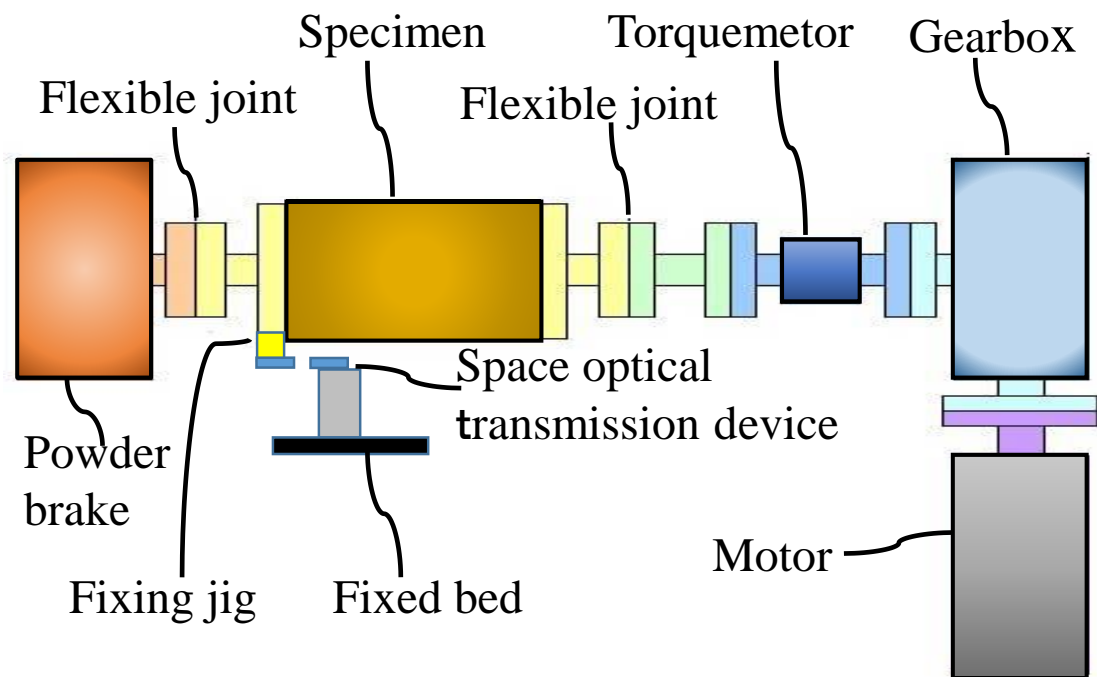


Fig. 5.6 Schematic figure of experimental equipment

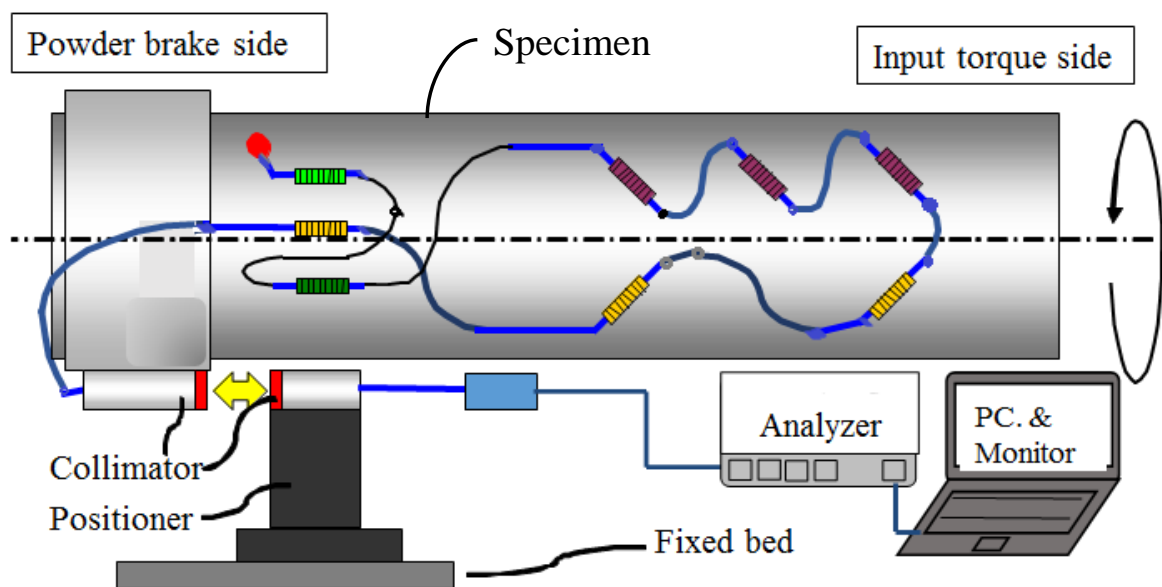


Fig. 5.7 Measurement system for rotation torsional load test

Table 5.2 Specification of measurement system

Composition	Specification
Sensor & Fiber	FBG sensor *8
	Single mode optical fiber
Space optical transmission device	Confrontation type collimator
	Positioner
Spectrum analyzer	Anritsu AR4011A
Processor & Monitor	Core i5-2.4GHz

5.3.2 回転無負荷試験

(1) 間欠的な空間光伝送と光学的特性起因の波長シフト

間欠的な空間光伝送においては、著者らはその性能評価のための指標として、回転速度ごとのデータ取得率、データ取得回数および光学的特性起因の波長シフト量を導入した⁽¹⁰⁾。

実験結果から求まるデータ取得回数 N_e とデータ取得率 $d_1(\%)$ との関係は式(5.3)であり、ここで光結合機会数 n_c は軸回転数 $R_c(\text{rpm})$ 、測定時間 $\Delta T(\text{sec})$ を用いて式(5.4)となる。

$$d_1 = 100 \times \left(\frac{N_e}{n_c} \right) \quad (5.3)$$

$$n_c = \left(\frac{R_c}{60} \right) \times \Delta T \quad (5.4)$$

ここで、データ取得回数は測定時間内にデータ伝送・取得に成功した回数とする。

次に理論的なデータ取得率 d_2 は、計測器サンプリング周波数 $n_s(\text{KHz})$ 、有効光軸間距離 L_e 、回転速度 $v_\theta(\text{mm/ms})$ 、波長掃引範囲 $\Delta\lambda_s(\text{nm})$ 、波長掃引速度 $v_s(\text{nm/ms})$ から式(5.5)で得られる。また、 v_θ は軸中心とコリメータ中心との距離を示す回転半径 $r(\text{mm})$ を用いて $v_\theta = 2 \times \pi \times r \times (R_c / 60000)$ となる。基準光軸間距離 L_0 は静的状態のもので、 L_e は L_0 に対し実際の測定中に各種の外乱要因から減少した値となる。さらに式(5.5)を変形した式(5.6)を用いて、 d_1 または d_2 から L_e を推定できる。

$$d_2 = 100 \times n_s \times \left[\left(\frac{L_e}{v_\theta} \right) - \left(\frac{\Delta\lambda_s}{v_s} \right) \right] \quad (5.5)$$

$$L_e = v_\theta \times \left[\left(\frac{d_2}{100} \right) \left(\frac{1}{n_s} \right) + \left(\frac{\Delta\lambda_s}{v_s} \right) \right] \quad (5.6)$$

一方、光学的特性起因の波長シフトとは、光学的結合特性に起因する要因と低光強度に起因する要因により生ずる波長の変化を指し、受光器増幅用対数アンプを使用した計測器と間欠的な空間光伝送の場合に顕著な現象になるといわれている⁽¹⁰⁾。このように、間欠的な空間光伝送においては、光学的特性に起因する波長シフトの影響を受けやすいので、フィルターなどを設けて光学的特性に起因する波長シフトの影響を緩和した上で、通常通り複数回の測定データ平均化処理を行う必要がある。そのため、次のフィルターを設けて、平均化処理に使用できる有効測定データの抽出を行う。

- 1) 設置全 FBG センサの反射波長を検出できた測定のみ有効と判断する。
- 2) 光学的特性に起因する波長シフト量を規制するしきい値を設ける。

ここで、光学的特性起因の波長シフト量 $\Delta\lambda_s(\text{pm})$ は、測定波長 $\lambda_1(\text{nm})$ 、初期波長 $\lambda_0(\text{nm})$ を用いて式 (5.7) で与えられる。

$$\Delta\lambda_s = 1000 \times (\lambda_1 - \lambda_0) \quad (5.7)$$

$\Delta\lambda_s$ の評価の目安は、計測器の測定精度や分解能、ならびに測定対象となる物理変化量からみた許容精度などを勘案して決める。この評価目安の妥当性や基本性能を確認するため、無負荷・無ひずみで測定対象の物理変化に起因する波長シフトが生じない回転試験を行う。無負荷の回転試験結果を整理することで、各試験装置の測定信頼性を推定できる。

(2) 試験結果

この回転試験装置における光学的空間伝送装置での間欠的な空間伝送性能確認のため、無負荷の回転試験を実施した。図 5.8 は、データ取得率とデータ取得回数に及ぼす回転速度の影響を示す。計算値は、式 (5.3) による実験のデータ取得率 d_1 を式 (5.6) に代入して得られた有効光軸間距離 $L_e = 0.23\text{mm}$ を使用して、式 (5.5) から求めた d_2 である。式 (5.5) の他の計算条件として、計測器サンプリング周波数 n_s は 1.25KHz、回転半径 r は77mm、波長掃引範囲 $\Delta\lambda_s$ は27nm、波長掃引速度 v_s は 430nm/msである。図には、光学的特性起因の波長シフトの整理結果もあわせて示す。

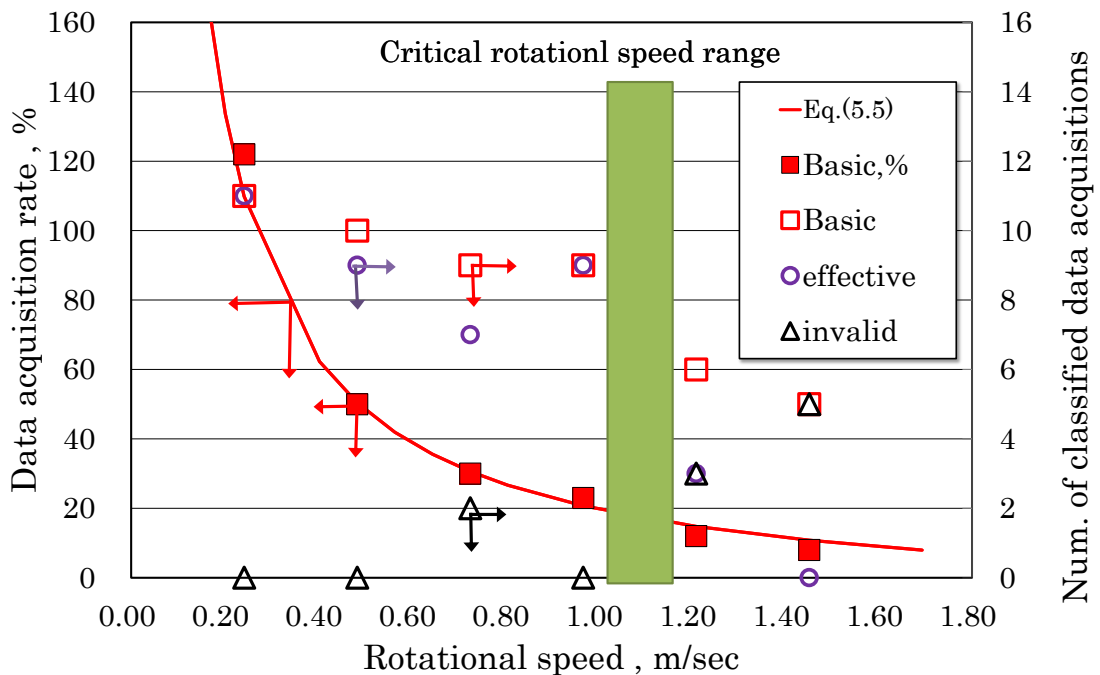


Fig. 5.8 Performance of space optical transmission device (no-load rotation test)

図では、式 (5.5) によるデータ取得率の計算値 d_2 ($n_s = 1.25\text{KHz}$, $L_e = 0.23\text{mm}$, 図の左軸, 実線) を示す。また、回転速度 v_θ (軸回転数 R_c) ごと測定時間 ΔT 20 秒間で、式 (5.3) による実験のデータ取得率 d_1 (図の左軸, ■点), データ取得回数 N_e (図の右軸, □点) の内数として、式 (5.7) による光学的特性起因の波長シフト量 $\Delta\lambda_s$ が 10pm 以下となるデータ

取得回数 N_1 (図の右軸, ○点), 100pm 以上となるデータ取得回数 N_2 (図の右軸, △点) を示している. 図 5.8 より, n_s が 1.25KHz の場合, v_θ が 1.5m/sec ($R_c = 180\text{rpm}$) まで d_1 が 8% で測定でき, 有効測定の可能条件が, $N_1 > N_2$ および測定データ平均化処理の必要性から $N_1 \geq 4$ とすると, 有効測定の限界回転速度域は $v_\theta = 1.0 \sim 1.2\text{m/sec}$ ($R_c = 120 \sim 150\text{rpm}$) であることがわかる. また, 実験において有効測定できるデータ取得率の目安も 20% 以上であることがわかる.

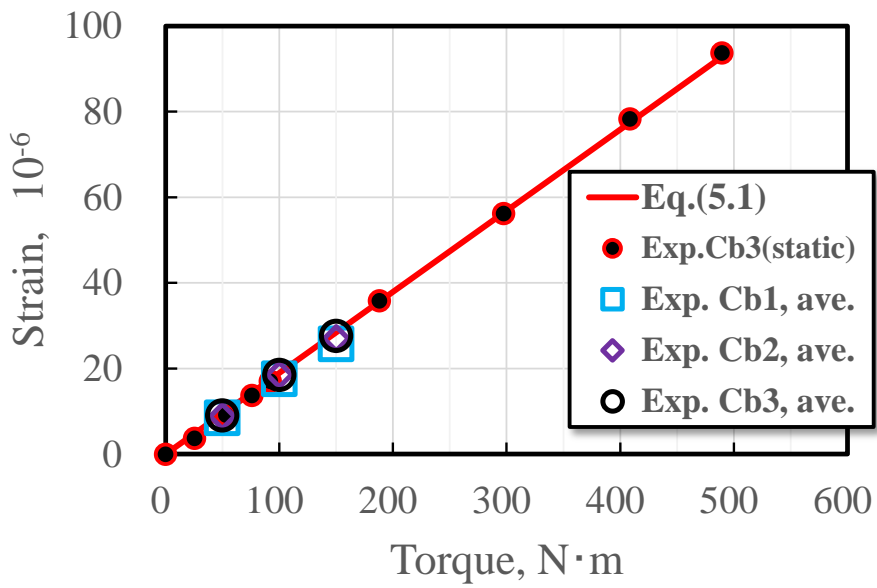
5.3.3 回転ねじり負荷試験

(1) ひずみの測定結果

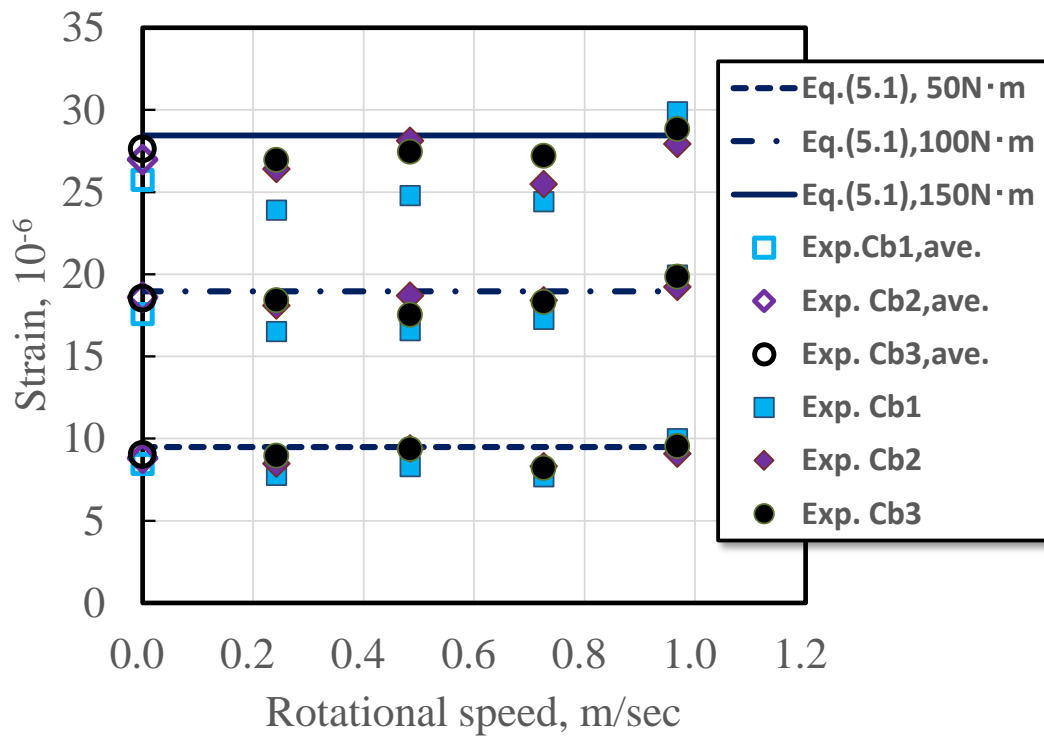
回転無負荷試験の結果を踏まえて、有効測定の限界回転速度である $v_{\theta} = 1.21\text{m/sec}$ ($R_c = 150\text{rpm}$) まで $v_{\theta} = 0.24\text{m/sec}$ ($R_c = 30\text{rpm}$) 刻み 5 点、トルクは試験装置能力の制限から $150\text{N}\cdot\text{m}$ まで $50\text{N}\cdot\text{m}$ 刻み 3 点で試験を行った。図 5.9 にトルクによる発生ひずみの測定結果を示す。測定時間 ΔT は約 20 秒である。

図 5.9(a)では、横軸にトルク、縦軸にひずみで式 (5.1) による計算値 (実線)、対センサ Cb3 の静止ねじり試験の測定値 (●点)、対センサ Cb1 の測定平均値 (□点)、対センサ Cb2 の測定平均値 (◇点)、対センサ Cb3 の測定平均値 (○点) を示している。平均値とは、回転速度 5 点のうち有効測定できた 4 点のひずみの平均を指す。図から、線形性を維持して、計算値や静止ねじり試験結果とも良く一致していることがわかる。

図 5.9(b)では、横軸に回転速度、縦軸にひずみで式 (5.1) を用いて、トルク $50\text{N}\cdot\text{m}$ の計算値 (破線)、トルク $100\text{N}\cdot\text{m}$ の計算値 (一点鎖線)、トルク $150\text{N}\cdot\text{m}$ の計算値 (実線) を示す。また、回転速度 0m/sec には各対センサの測定平均値を示し、有効測定できた回転速度 4 点について、対センサ Cb1 の測定ひずみ (■点)、対センサ Cb2 の測定ひずみ (◆点)、対センサ Cb3 の測定ひずみ (●点) を示している。図から、Cb1, Cb2, Cb3 の順で測定精度が良くなることがわかる。これは静止ねじり試験結果と異なるが、その理由として、Cb2 は軸力または曲げによるひずみが発生して、それを直接相殺するセンサ構成が有効に作用している。一方、Cb1 は回転端部に近く、静止ねじり試験時にはない外乱要因により悪化しているためと推定される。



(a) Linear characteristics



(b) Rotation speed characteristics

Fig. 5.9 Results of measured strain for rotational loading

(2) 空間光伝送性能の測定結果

空間光伝送性能の評価指標について、回転ねじり負荷試験結果を整理して、図 5.10 に示す。図 5.10(a)には、横軸に回転速度、縦軸にデータ取得率として式 (5.5) の計算値 d_2 ($n_s = 1.25\text{KHz}$, $L_e = 0.23\text{mm}$, 実線)、式 (5.3) による実験のデータ取得率 d_1 (■点) を示している。図から、有効測定できるデータ取得率の目安が 20%以上であるとした場合には、無負荷の回転試験結果と同様に、 $v_\theta = 1.0\sim 1.2\text{m/sec}$ ($R_c = 120\sim 150\text{rpm}$) が有効測定の限界回転速度域であることがわかる。ただし、 $v_\theta = 0.73\text{m/sec}$ ($R_c = 90\text{rpm}$) 付近に別途性能低下要因があると推定される。

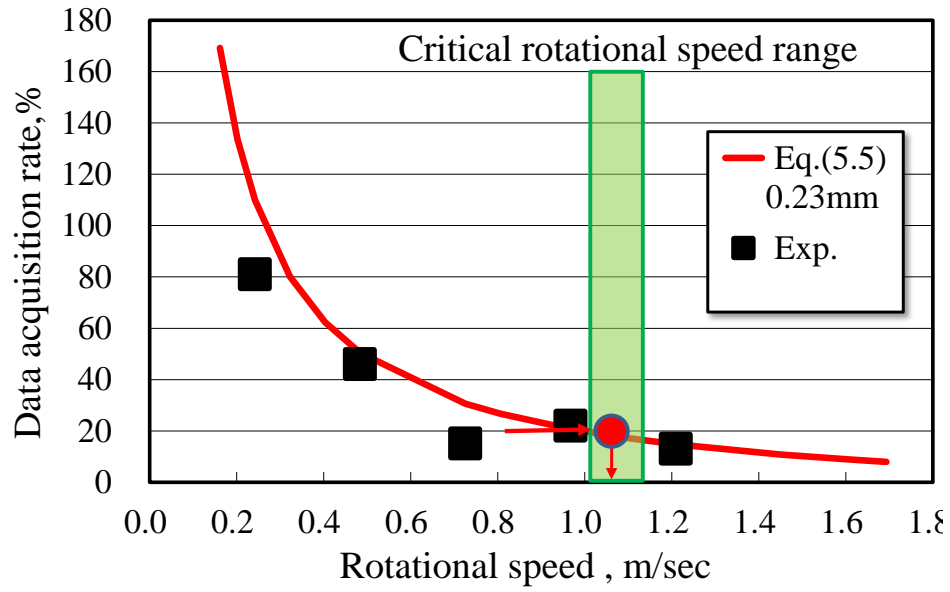
図 5.10(b)には、横軸に回転速度、縦軸に波長シフト量 $\Delta\lambda$ (pm)として式 (5.1) と式 (2.2) を用い、トルク $50\text{N}\cdot\text{m}$ の計算値 (破線)、トルク $100\text{N}\cdot\text{m}$ の計算値 (一点鎖線)、トルク $150\text{N}\cdot\text{m}$ の計算値 (実線) を示す。また、有効測定できた回転速度 4 点について、センサ①の測定波長シフト量 (●点)、センサ②の測定波長シフト量 (■点)、センサ⑥の測定波長シフト量 (□点)、センサ⑦の測定波長シフト量 (◇点)、センサ⑧の測定波長シフト量 (○点) を示している。図から、 $v_\theta = 1.2\text{m/sec}$ ($R_c = 150\text{rpm}$) で明確な異常測定となっており、大きな光学的特性起因の波長シフトが生じているものと推定される。ここからも、有効測定の限界回転速度域は $v_\theta = 1.0\sim 1.2\text{m/sec}$ ($R_c = 120\sim 150\text{rpm}$) であることがわかる。

(3) 軸馬力の計算式

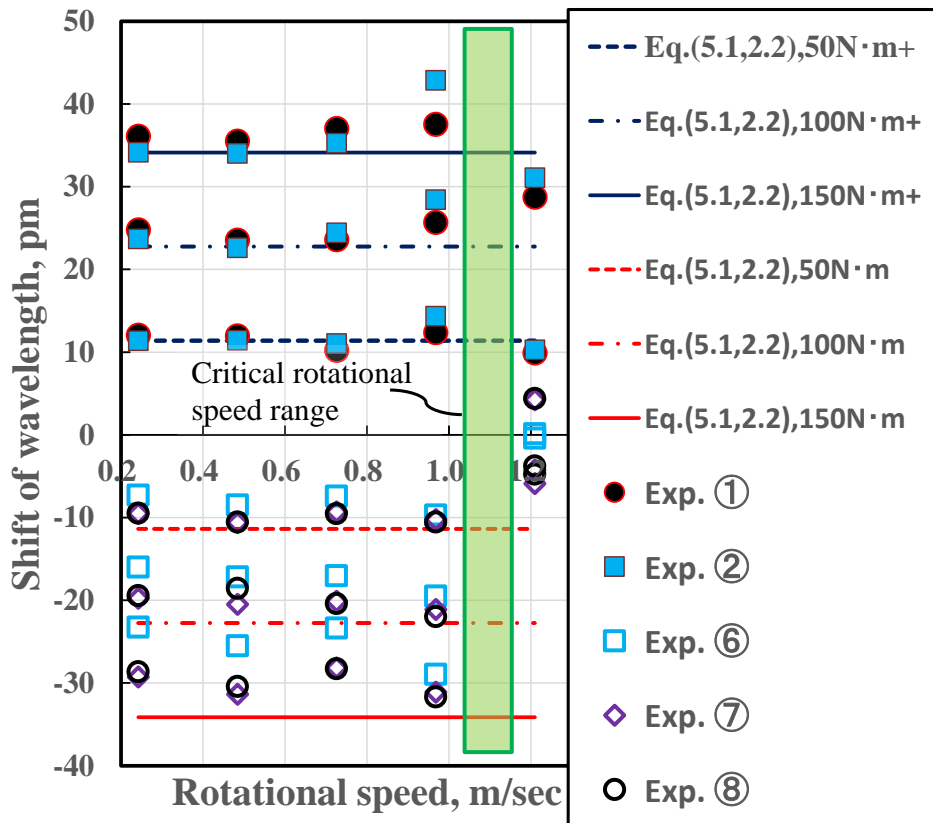
軸馬力は、測定したひずみデータから式 (5.8) で計算できる。

$$Skw = 2\pi \frac{R_c}{60} \frac{1}{1000} \frac{GJ}{r_s} \left\{ \sqrt{\left(\frac{1+\varepsilon}{\cos\theta}\right)^2} - 1 - \tan\theta \right\} \quad (5.8)$$

ここで、 Skw は軸馬力(kw)、 R_c は軸回転数(rpm)、 GJ は軸ねじり剛性(Nm²)、 r_s は軸半径(m)、 ε は測定ひずみ、 θ は周方向展開時のFBG張線角度(°)である。



(a) Critical rotational speed and data acquisition rate



(b) Critical rotational speed and shift of wavelength

Fig. 5.10 Performance of space optical transmission device

5.4 考察

5.4.1 ひずみ測定精度の評価

表 5.3 に、静止ねじり負荷試験と回転ねじり負荷試験で測定されたひずみの誤差について、比較のため、図 5.4 と図 5.9(a)をもとに二乗平均誤差として計算した結果を示す。表から、静止ねじり試験結果と比べ回転により 2.6%精度が低下し、対センサは平均 94%程度の測定精度であることがわかる。対センサ Cb3 の場合には、測定精度は 96.4%で回転による精度低下は 1.1%である、ここで、回転による精度低下の理由として、光学的起因の波長シフトの発生という光学的要因、および回転に伴う曲げや軸力などねじり以外に起因するひずみの増加という物理的要因が考えられる。光学的要因は全センサ共通のもので、空間光伝送性能を向上させる対策(センサ数や波長掃引範囲の縮小などを含む)をとるのに対し、物理的要因については、個別センサごとに異なるので図 5.10(b)をもとに分析を行う。

Table 5.3 difference of strain error in two torsion test

Item	Static torsional load	Rotation torsional load
	Strain error*, %	Strain error*, %
Exp. Cb1	3.0	9.6
Exp. Cb2	5.4	5.5
Exp. Cb3	2.5	3.6
Exp. Ave.	3.6	6.2

*Strain error: Sum of squares mean strain error between measured values and calculated values at each measurement points.

図 5.10(b)から、全センサが計算値に対し+側にシフトする傾向を示すが、センサ①②と⑥⑦⑧ではやや差がみられる。対センサとして誤差相殺されると同時に、その差が残存誤差となっていることがわかる。その原因は、曲げと軸力によるひずみの影響をうまく分離できていないことによると推定される。また、場所 P1 のセンサ⑥は、P2 や P3 の⑦⑧と比較し誤差が大きく、場所により影響が異なることがわかる。これは、P1 が回転端部に近いことと関係があると推定される。

このことから、対センサによる精度向上には、目的に応じた複数センサの組合せ方が重要で、センサの張線角度や取付け位置（軸方向，周方向）を適正に選択することである。目的に応じた対センサ構成の最適化（適正な波長掃引範囲のセンサ数，波長配置など含む）により計測手法を改善できる。また、当面の FBG センシングの精度向上は、対センサの構成（通常センサの周方向配置や張線角度の変更含む）見直しという現仕様の改良で可能と考える。

Table 5.4 Critical rotational speed range

Item		Reference ^{*1}	Present
		Le ^{*2} =1.3mm	Le ^{*2} =0.23mm
Poor level ^{*3}	v_{θ} (m/sec)	6.5	1.5
	R_c (rpm)	800	180
Good level ^{*4}	v_{θ} (m/sec)	5.6	1.0
	R_c (rpm)	700	120

^{*1}Reference:3.3 of this paper

^{*2} Le: Effective distance between two optical axes.

^{*3} Poor level: Data acquisition rate is 10-12%.

^{*4} Good level: Data acquisition rate is over 20%.

5.4.2 空間光伝送性能の評価

表 5.4 に、著者らが既に報告した回転試験結果⁽⁷⁾、ならびに今回行った無負荷の回転試験、双方の空間光伝送性能について比較した結果を示す。船舶の常用軸回転数が 100～400 rpm で、概ね回転速度が 6.0m/sec 以下であることから、本計測システムは、船舶用の軸馬力計として基礎的な空間光伝送性能を保有しているといえる。ただし、回転ねじり負荷試験で確認された、有効測定できる限界回転速度は 1.0m/sec 超であるので、目標とする近海航路船を中心に隻数が多い船舶の軸回転速度域 2.0～4.0m/sec に対応するために、空間光伝送性能の改善が課題となる。

ここで、有効測定できる限界回転速度が、前回試験における 5.6m/sec（以下、基準伝送性能と呼ぶ）から今回 1.0m/sec 超へと低下した理由は、式（4.7）より他のパラメータは同じなので、有効光軸間距離 L_e が 1.3mm から 0.23mm に低下したことにあるといえる。 L_e は対向するコリメータの軸径方向ズレが影響するので、二つの回転試験装置間には回転により発生するズレに差があり、その差は装置剛性の差に起因するものが大きく、試験体のフランジ軸継手における、固定軸継手とたわみ軸継手の違いなどが推定される。

この推定の確認を図 4.11 の FEM モデルを使用して行った。詳細は示さないが、固定軸継手とたわみ軸継手の違いの影響を反映させられるモデルとした。FEM 解析の結果、静的には試験体の製作誤差（芯ズレなど）、たわみ軸継手のゴムブッシュの剛性が試験体フランジの面外変形に影響を与えることがわかった。回転ねじり負荷試験時には、ねじり以外の発生外力（軸力、曲げモーメントなど）とカップリングがおき、試験体フランジの面外変形が加速し、たわみ軸継手の装置剛性が大きく低下することもわかった。一方、固定軸継手では、同じ条件下で試験体フランジの面外変形がなく、そのため装置剛性の低下がみられず、たわみ軸継手とは装置剛性面で大きな差のあることが確認できた。

船舶主機軸の支持構造は固定軸継手に近く剛性は高いので、基準伝送性能からの性能低下は小さく、有効測定できる限界回転速度は、現仕様の改良により、近海航路船の軸回転

速度域に対応できると考えられる。

空間光伝送性能の改善には、二つの方向性がある。一つめは基準伝送性能を大きくすること、二つめは基準伝送性能の低下を小さくすることである。現仕様の改良とは、二つめの方向性にそって、コリメータ取付け治具を含む装置剛性を大きくすることで基準伝送性能近くの実現を目指すことを指す。更なる性能向上が必要な場合には、計測手法の改善として、一つめの方向性にそって、本研究の成果である評価指標（データ取得率、データ取得回数、光学的特性起因の波長シフト）と評価目安を使用して必要な設計仕様を決めることになる。この場合にも、基準光軸間距離 L_0 を大きくするためコリメータ径や光源容量を大きくする方向と、データ取得率やデータ取得回数を大きくするため、計測器を含め計測システム全体を見直す方向に分かれる。

以上のような施策を組合せることで、実際の外乱環境のもとで目的に応じた実用的な空間光伝送性能をえることができると考える。

5.5 結言

FBG 光ファイバセンシングを使用した回転軸モニタリングシステムの構築を提案し、適用の具体例として近海航路船を想定した軸馬力計測システムを製作、回転試験装置にて回転ねじり負荷試験を行い、ひずみ測定精度および空間光伝送性能について総合的な性能を評価・検証した。その結果、目標である近海航路船の軸馬力計測には、現仕様の改良（対センサの構成見直しや装置剛性の手直し）により対応可能である。更なる性能向上が必要な場合には、計測手法の改善を行えば良い。つまり FBG センシングのひずみ測定精度については、目的に応じた対センサ構成の最適化（取付け位置、張線角度の異なる複数センサ組合せと適正な波長掃引範囲のセンサ数、波長配置などの選択）を行う。また空間光伝送性能については、本研究の成果である評価指標（データ取得率、データ取得回数、光学的特性起因の波長シフト）と評価目安を使用して必要な設計仕様を決める。こうした、二段階の対応により適用可能なことがわかった。

さらに、FBG センサの張線角度・施工法・センサ種別・対センサを適正に選択することで、回転軸の健全性判断に必要なひずみ分布測定だけでなく、あわせて温度、トルク、軸馬力、スラスト力なども計測可能で多目的な回転軸モニタリングに拡張可能なこともわかった。したがって、残る課題は実際の使用環境と長期間使用を想定し、実用面から計測手法およびそれを具体化したシステムの詳細仕様をつめることである。

参考文献

- (1) 三田彰, スマート建築構造物と光ファイバセンサ, 第 50 回理論応用力学講演会講演論文集 (2001), pp.527-528.
- (2) 武田展雄, 構造ヘルスマニタリング技術の研究開発, 日本航空宇宙学会誌, 第 52 巻, 第 605 号(2004), pp.142-148.
- (3) 日下部佳子, 功刀竜介, 対馬和弘, <連載>EEDI<上>/海運・造船の何がかわるか, 日刊海事プレス, 9 月 28 日(2011a), pp.4-5, 株式会社海事プレス社.
- (4) 日刊海事プレス, MHI マリンエンジ, 無線式の光学軸馬力計を開発, 日刊海事プレス, 5 月 17 日(2013), p.10, 株式会社海事プレス社.
- (5) 三上郁夫, 琉球海運の省エネ運航の取り組み, 日本船舶機関士協会,
<<http://www.marine-engineer.or.jp/images/2013ppt3.ppt>> (2013), pp.12-14,
(参照日 2014 年 5 月 28 日).
- (6) 加納敏幸, 佐藤圭二, 実海域船舶性能データの Visual Mining Studio を用いたマイニング, 数理システム ユーザーコンファレンス (2012), pp.5-25.
- (7) 葉山裕, 大島史洋, 衣袋順一, 松尾晃, 萩原世也, FBG 光ファイバセンシングによる回転軸の光学的空間伝送性能評価, 日本機械学会論文集, 第 81 巻, 第 826 号(2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00072.
- (8) 渡辺理, ひずみゲージとその応用 (1982), pp.63-77, 株式会社日刊工業新聞社.
- (9) 鶴戸口英善, 川田雄一, 倉西正嗣, 材料力学 上巻(1957), pp.96-104, 裳華房.
- (10) 斎藤崇記, 高精度 FBG センサモニタ, 電気学会計測研究会(2012), IM-12-041.

第 6 章 結論

6.1 結言

本研究では、FBG センシングとその測定データが軸外周から系外へ間欠的に空間光伝送される回転軸モニタリングシステムについて、以下の検討を行った。

第 2 章 回転軸モニタリングシステムの基礎

第 3 章 FBG センシングによる回転軸の空間光伝送性能評価

第 4 章 FBG センシングによる円筒表面のねじりひずみ分布計測

第 5 章 FBG センシングによる回転軸表面のねじりひずみ分布計測

第 2 章 「回転軸モニタリングシステムの基礎」では、回転軸モニタリングシステムの構成、および FBG 方式光ファイバセンシングに関してその原理、FBG センサの感度や固定方法について説明した。

第 3 章「FBG センシングによる回転軸の空間光伝送性能評価」では、光ファイバセンシングを回転軸モニタリングへ適用する際、課題となる回転軸から測定データの取出しに対し、回転軸外周に取付けた光学的空間伝送装置により行う計測手法の性能評価について述べた。光学的空間伝送装置の静的試験では、Beam Waist 径 0.3mm に対し、基準光軸間距離は 1.3mm であり、回転無負荷試験では回転速度が 6.5m/sec（軸回転数 800rpm）まで測定でき、精度面からは 5.6m/sec（軸回転数 700rpm）付近まで有効に測定できることを示した。あわせて間欠的な空間光伝送性能の評価指標（データ取得率、データ取得回数、光学的特性起因の波長シフト）も性能予測に利用できることも示した。ただ実用に際しては各種の外乱環境への対応が要求されるので、その場合には性能向上施策が必要となることも付記している。

第 4 章「FBG センシングによる円筒表面のねじりひずみ分布計測」では、測定に使用す

る **FBG** センシングに関し、円筒体表面で測定ねじりひずみ分布の精度評価について述べた。曲率の大きな曲面への、光ファイバセンサの取付け使用例は少なく、線センサである光ファイバセンサは、点センサである従来方式以上に曲率の影響を受けやすいと考えられる。特に、軸方向に角度をとって張線するねじりによるひずみ計測の場合には、測定精度に与える影響を把握しておく必要があると推定された。また、互いに精度補完しあう複数のセンサの組合せによる **FBG** 対センサも、ひずみ計測精度の向上には有効と思えた。そこで、円筒体表面のねじりによるひずみ分布の測定に **FBG** 方式の光ファイバセンサを使用する場合の精度について、大きな曲率の影響と互いに精度補完しあう複数センサの組合せる **FBG** 対センサに着目した。そのため、**FBG** センサの精度に影響を与える諸要因の確認試験を行ったうえで、円筒体に取り付けた **FBG** 光ファイバセンサの性能評価のために静止ねじり負荷試験を行った。円筒表面に発生するねじりひずみ分布や温度の測定結果をもとに、**FEM** 解析結果との比較を含め精度を評価した。その結果、**FBG** センサの張線角度・施工法・センサ種別を選択し、互いに精度補完する複数センサを組合せて対センサとすることなどで単独センサに比較して 4~5%誤差を削減し、精度は平均 96.4%で測定できている。こうして回転軸の健全性判断に必要なひずみ分布を測定でき、あわせて温度、トルクなど計測可能なことを示した。また、曲率が光ファイバセンサの波長シフトに与える光学的影響は、曲げ径 30mm 以上の円筒体ならば無視できることもわかった。

第 5 章「**FBG** センシングによる回転軸表面のねじりひずみ分布計測」では、回転軸モニタリングシステム的具体例として軸馬力計測システム（回転軸表面のねじりひずみ分布測定）を想定し、**FBG** 対センサとその測定データの軸外周からの間欠的な空間光伝送による系外取り出しからなる計測手法に関し、回転試験装置にて回転ねじり負荷試験を行ったうえでの総合的な性能評価について述べた。

実環境に近い回転試験装置での回転ねじり負荷試験であるので、FBG 対センサの測定精度については、静止ねじり試験に対し回転負荷による影響をうけ、更に軸外周からの間欠的な空間光伝送については、回転無負荷試験に対しねじり負荷による影響をうける。試験結果から、静止ねじり試験に対し回転負荷による影響をうけた FBG 対センサの測定精度は、誤差が 2~3%程度増加し 94%であることを示した。次いで、回転無負荷試験に対しねじり負荷による影響をうけた軸外周からの間欠的な空間光伝送性能についても、その評価指標（データ取得率、データ取得回数、光学的特性起因の波長シフト）は性能予測に利用できることも示した。

ただし、軸外周からの間欠的な空間光伝送性能は、有効測定限界が回転無負荷試験の回転速度 5.6m/sec（軸回転数 700rpm）から 1.0m/sec（120rpm）に低下した。船舶用軸馬力計として適用を想定する近海航路船の主機軸回転速度が 2.0~4.0m/sec 程度であることから性能改善が必要であるけれども、推定される低下の主要因は、回転無負荷試験の場合、旋盤でフランジ軸継手が固定軸継手であったのに対し、回転ねじり負荷試験の場合、回転試験装置でフランジ軸継手がたわみ軸継手だったことから、剛性の低下が起こす対向するコリメータ光軸間のズレ増加であることを述べた。さらに、船舶の主機軸の支持構造は固定軸継手に近く剛性が高いことから、実船測定での性能低下は緩和され、現仕様の改良で、目標の近海航路船の軸馬力計測に対応可能と考える。現仕様の改良は、対センサ構成の見直しや装置剛性の手直し程度を指す。更なる性能向上が必要な場合には計測手法の改善として、FBG センシングについては対センサ構成の最適化（目的に応じた取り付け位置、張線角度のセンサ組合せと適正な波長掃引範囲のセンサ数、波長配置など）を行い、また伝送性能については本研究の成果である評価指標（データ取得率、データ取得回数、光学的特性起因の波長シフト）と評価目安を使用して必要な設計仕様を決めることになる。

さらに、FBG センサの張線角度・施工法・センサ種別・対センサを適正に選択すること

で、回転軸の健全性判断に必要なひずみ分布測定だけでなく、あわせて温度、トルク、軸馬力、スラスト力なども計測可能で多目的な回転軸モニタリングに拡張可能なこともわかった。したがって、残る課題は実際の使用環境と長期間使用を想定し、実用面から計測手法およびその具体化としてのシステムの詳細仕様をつめることだと述べた。

以上をまとめて、図 6.1 に本研究の要約と図 6.2 に研究の今後の方向性について示す。

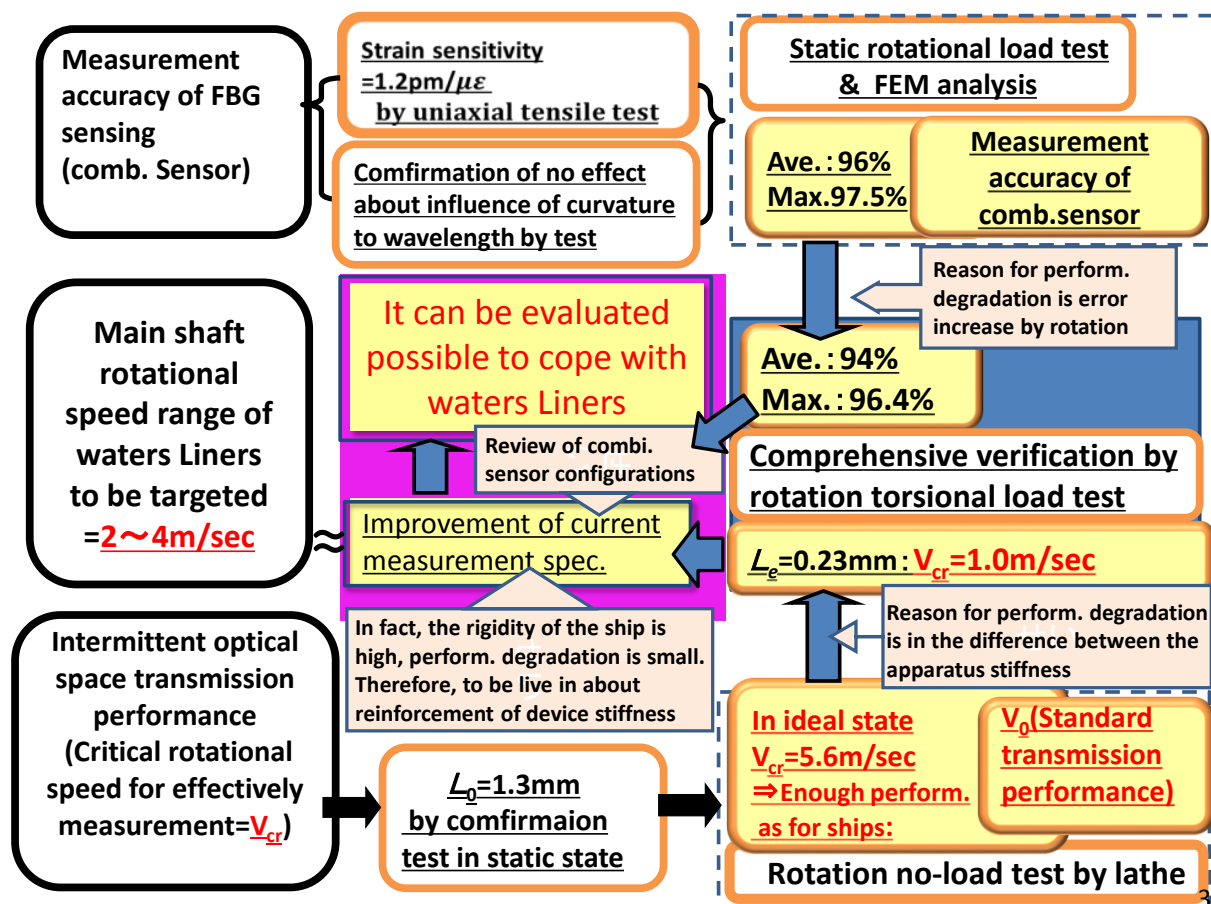


Fig.6.1 Summary of this study

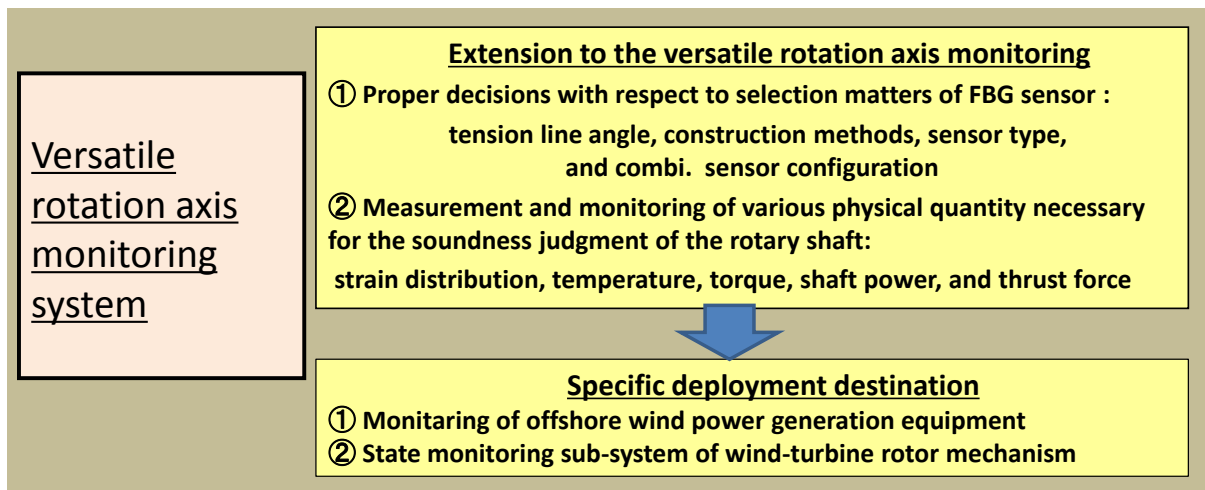
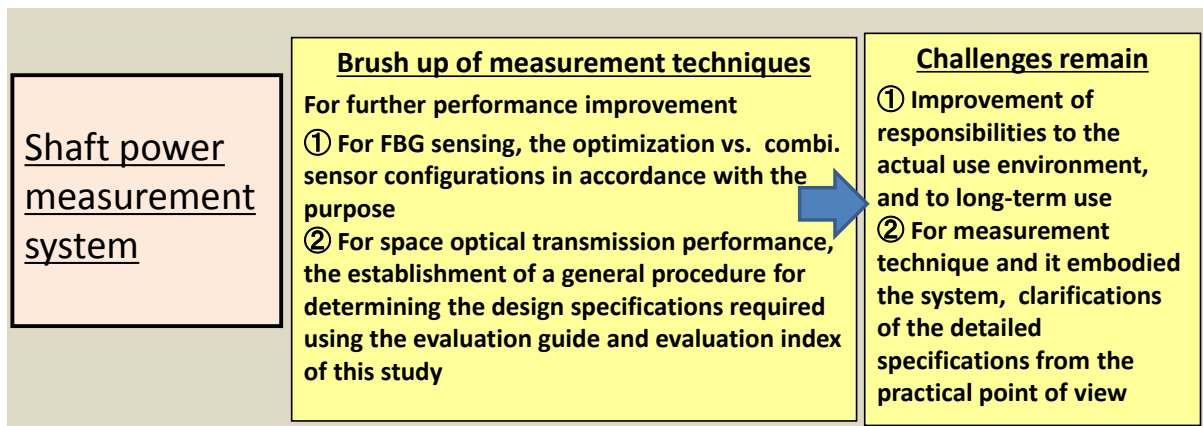


Fig.6.2 Next direction of this study

6.2 回転軸モニタリングの今後の展開

6.2.1 船舶用軸馬力計測システム

FBG センシングとその測定データの軸外周から間欠的な空間光伝送を活用した計測システムについて、船舶用軸馬力計測システムとして近海航路船（総トン数 1,000～10,000 t，国内および東アジア，東南アジア航路）を主たる対象に，実際の環境での利用を可能にするシステム仕様に改善を計る必要がある。

回転ねじり試験結果から，目標の近海航路船の軸馬力計測に現仕様の改良で対応可能と考える。現仕様の改良は，対センサ構成の見直しや装置剛性の手直し程度を指す。更なる性能向上が必要な場合には計測手法の改善として，FBG センシングについては対センサ構成の最適化を行い，また伝送性能については本研究の成果である評価指標（データ取得率，データ取得回数，光学的特性起因の波長シフト）と評価目安を使用して必要な設計仕様を決めれば良い。対センサ構成の目的に応じた最適化とは，張線角度・取付け位置（軸方向，周方向）・施工方法（センサ種別，取付法），単独センサの組合せ方法を選択して，適正なセンサ数で測定精度の向上，出力項目増加の最大化を計ることである。また，伝送性能について決めるべき設計仕様とは，与条件として回転軸径・常用軸回転数・回転系剛性などのもとで，評価目安のデータ取得率 20%以上，有効データ取得回数 4 回以上を満足するように，計測器のサンプリング周波数・波長掃引速度，基準光軸間距離（光源パワーやコリメータ Beam Waist 径），対向コリメータ数などの機器仕様を選択，運用面では高回転速度域での性能向上のため，適正なセンサ数と中央波長，掃引波長範囲の設定を行うことである。

したがって，残る課題は，地上室内・短期間の試験とは異なった実際の使用環境と長期間使用を想定した検討を行い，実用面から計測手法およびシステムについて以下のような詳細仕様をつめることである。

- 光軸調整, ブレ修正方法
- コリメータレンズのクリーニング方法
- 光学的伝送装置の取付け治具
- センサの取付け施工法
- FBG ひずみセンサの温度補正方法

図 6.3 に近海航路船の駆動中間軸へ光学的空間伝送装置の取り付けイメージを示す.

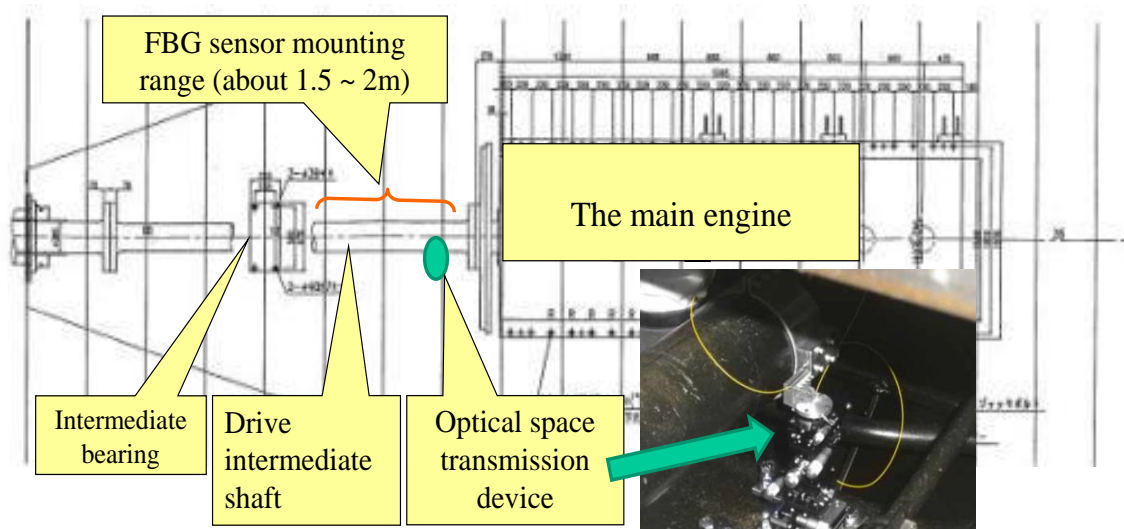


Fig. 6.3 Mounting diagram of the optical space transmission devices to drive intermediate shaft of waters Liners

6.2.2 多目的な回転軸モニタリングシステム

洋上風力発電設備は、厳しい仕様環境下で大きな経年劣化にさらされるので、設備利用率を長期にわたって維持する必要がある。そのため、遠隔地から設備状態の常時監視を行い、異常の早期発見や故障診断・予測によりメンテナンス性を改善できるモニタリングシステムのニーズは強く存在している。そのため、洋上風力発電設備用モニタリングシステムに、提案する計測システムを適用できないか検討を行った。

表 6.1 と図 6.4 に、洋上風力発電設備用モニタリングシステムの構成と光ファイバセンシングを使用したサブシステムの概要を示す。図や表に示した「Rotating mechanism」が風車回転機構状態監視サブシステムで、回転軸モニタリングの対象と考えられる。

風車回転機構状態監視サブシステムは、主軸（ローター軸、発電機軸）、ヨー制御用軸などの回転軸モニタリング用として提案する計測システムを組み込むものである。当該部は故障率の高いブレード、ハブ、増速機・ヨー軸の歯車機構を含んでいるので、FBG センサでひずみ、温度、加速度、振動などを常時監視し、制御用や異常の早期発見を行えば、その効果は大きいと予想できる。

提案する計測システムを採用するメリットは、無線方式の場合には、計測器を風車単位個別に必要なものが、システム全体を一本のケーブルでつなぎ、1 台の計測器で集中管理できるようになる。大型風車ばかりでなく、クラスタ風車（集合風車）方式をとる中型風車の方が一層その効果は高く、コスト面ばかりでなくシステムのシンプルさという面でも、従来法に比較し十分優位にあると考える。

Table 6.1 Monitoring system for offshore wind power generator

Item	Sensor			Subject
	Temp.	Strain	Others	
Blade	○	○		Control pitch angle of blade
Rotating mechanism	○	○	Vibration	Maintenance
Tower	○	○	Inclination	Maintenance
Capacitor	○			Maintenance
Floating body	○	○	Inclination, Water level	Deformation monitoring
Optical composite cable	○	○		Deformation monitoring
Climate sensor mechanism	○		Wind power, Wind direction, Barometric press.	Climate monitoring

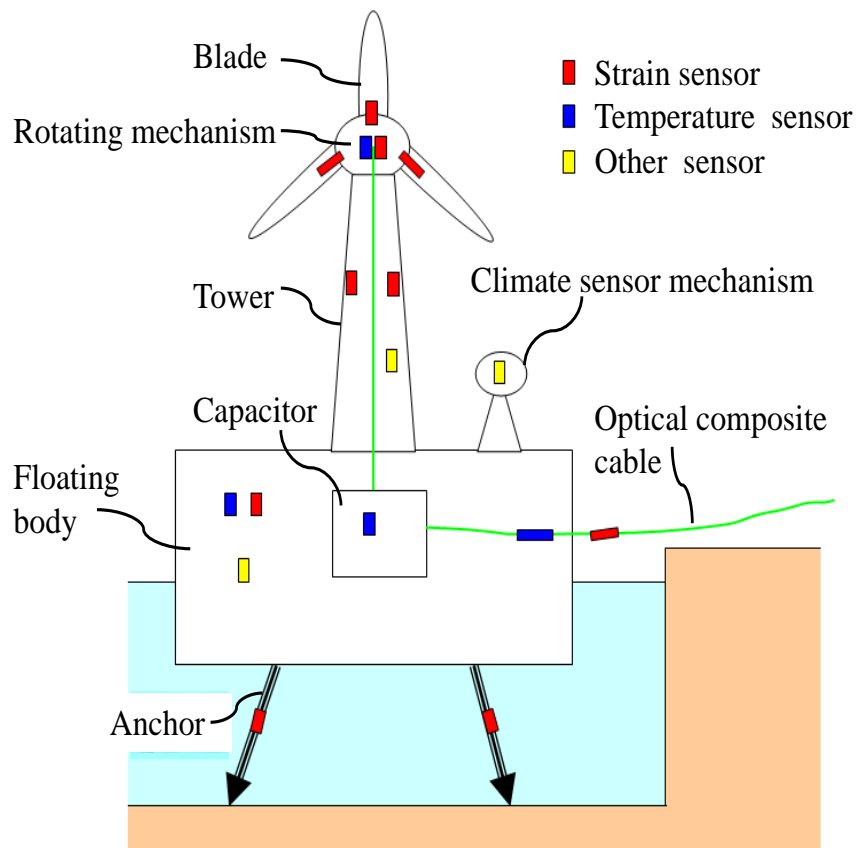


Fig.6.4 Monitoring system for offshore wind power generator using optical fiber sensing

謝 辞

本研究を遂行し、また、まとめるにあたり、多くの方々にご指導、ご助言、ご協力およびご鞭撻を頂き深く感謝しております。有難うございました。

佐賀大学大学院工学系研究科 萩原世也教授には、指導教員として終始適切なお指導を頂きました。深く感謝いたします。

同研究科の服部信祐教授、張波教授、森田繁樹准教授には副査として本論文の詳細にわたりご指導頂きました。深く感謝いたします。

同研究科の大島史洋講師には本研究の遂行にあたり、共同研究者としてご指導、ご助言、ご協力頂きました。深く感謝いたします。同じく、武富紳也准教授には本研究の遂行にあたり多くの助言を頂きました。深く感謝いたします。

なお、共同研究先である日鐵住金溶接工業株式会社の田畑和文氏には、光ファイバセンシングに関する多くの情報を提供頂き、同じく衣袋順一氏には試験器具の提供や実験の実施にご支援頂きました。共同研究先である(株)エス・イー・エー創研の松尾晃氏には、船舶海運業界の事情についてご教示頂き、および研究の遂行について多くのご助言頂きました。同じく元社員の杵尾憲治氏には、実験の実施と実験データの整理・提供にご支援頂きました。深く感謝いたします。

萩原研究室の皆さんには、本研究を進めるにあたり、論文や FEM 解析・実験データの整理などでお世話になりました。深く感謝いたします。

以上、ご指導、ご協力頂いた方々に対し、あらためて深謝の意を表します。