

システム技術開発調査研究

16-R-2

**F B G センサを利用した鉄鋼構造物の
ひずみ・亀裂発生・亀裂進展の
同時計測技術に関する調査研究
報 告 書
— 要 旨 —**

平成 17 年 3 月

財団法人 機 械 シ ス テ ム 振 興 協 会
委託先 財団法人エンジニアリング振興協会

KEIRIN



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、防災、都市、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには、技術開発力の強化に加えて、ますます多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢に対応し、各方面の要請に応えるため、財団法人 機械システム振興協会では、日本自転車振興会から機械工業振興資金の交付を受けて、経済産業省のご指導のもとに、機械システムの開発等に関する補助事業、新機械システム普及促進補助事業等を実施しております。

特に、システム開発に関する事業を効果的に推進するためには、国内外における先端技術、あるいはシステム統合化技術に関する調査研究を先行して実施する必要がありますので、当協会に総合システム調査開発委員会（委員長 放送大学 副学長 中島尚正 氏）を設置し、同委員会のご指導のもとにシステム技術開発に関する調査研究事業を民間の調査機関等の協力を得て実施しております。

この「FBGセンサを利用した鉄鋼構造物のひずみ・亀裂発生・亀裂進展の同時計測技術に関する調査研究報告書」は、上記事業の一環として、当協会が 財団法人エンジニアリング振興協会 に委託して実施した調査研究の成果であります。

今後、機械情報産業に関する諸施策が展開されていくうえで、本調査研究の成果が一つの礎石として役立てば幸いです。

平成17年3月

財団法人機械システム振興協会

はじめに

本報告書は、平成 16 年度に財団法人エンジニアリング振興協会が、財団法人機械システム振興協会から委託を受けて実施した「平成 16 年度 FBG センサを利用した鉄鋼構造物のひずみ・亀裂発生・亀裂進展の同時計測技術に関する調査研究」の成果を取りまとめたものである。

わが国では高度経済成長時代に建設された多くの産業設備の老朽化が進行し、これらのメンテナンスの重要性が高まっている。しかしながら各企業は、経済社会の激変による産業構造転換、諸外国との熾烈な競争など、厳しい環境下での高付加価値化やコストダウンが強く求められていることから、合理化策の一環としてメンテナンス関係の予算削減、人員削減にも踏み込まざるを得なくなっている。

また、これまでのメンテナンスは、プラント、施設を熟知した熟練技術者の技量に依存する部分も多く、これらの技術者の高齢化による世代交代時期と重なって、人材面でも問題を抱えることとなっている。

さらに、最近、国内では産業施設の大事故が多発し、その対策として経営トップの安全確保に係る責務、安全確保に必要な体制整備、安全対策の体系的な計画・実施等の対応が早急に求められている。

本調査研究は、産業構造物、社会インフラ、航空機等について早期に適切なメンテナンスを施していくため、対象構造物の「ひずみ」と「亀裂」を同時に、かつリアルタイムに一つのセンサにて検出できる小型、簡便、安価な新しいセンシング技術の開発を目指して調査研究を行ったものである。本年度は昨年度（財）機械システム振興協会から受託した「ハイブリッド型センシング技術に関する調査研究」に引き続き実施したもので、光ファイバ（FBG）センサにより鉄鋼材料におけるひずみと亀裂を同時に検出する技術及び亀裂進展監視技術の実用化可能性について検討した。検討した内容は、①ひずみと亀裂の同時検出技術の高度化、②亀裂進展監視技術の検討、③実用化に対する検討である。その結果、本計測手法で対象構造物の「ひずみ」と「亀裂」を同時に、かつリアルタイムに検出するための要素技術が確認された。

今後さらに高精度化、高信頼性、経済面の研究を行って、本技術が実現することとなれば、構造物の安全性、信頼性の向上が可能となり、産業界、公共施設へ果たす役割は極めて大きいと考えられる。

本報告書の成果が十分に活用されることを切に願うとともに、本調査研究にご協力いただいた関係各位に対して心から謝意を表する次第である。

平成 17 年 3 月

財団法人エンジニアリング振興協会
会 長 増 田 信 行

平成 16 年度
F B G センサを利用した鉄鋼構造物のひずみ・亀裂発生・
亀裂進展の同時計測技術に関する調査研究

報 告 書

－ 要 旨 －

目 次

序

はじめに

1. 調査研究の目的	1
2. 調査研究の実施体制	2
3. 調査研究の内容	7
第 1 章 本報告書の概要	7
第 2 章 鋼構造物の高度メンテナンスにおけるセンシング技術について	8
第 3 章 FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術の開発	10
3.1 昨年度までの成果と本年度の実施概要	10
3.1.1 昨年度までの成果	10
3.1.2 本年度の実施概要	10
3.2 超音波検出感度向上のためのシステム構築	11
3.2.1 目的	11
3.2.2 広帯域光源を利用した超音波検出	11
3.2.3 レーザ光源を利用した超音波検出	13
3.2.4 光源の違いによる超音波検出感度の比較	13
3.2.5 レーザ光源超音波検出システムによる欠陥検出	14
3.2.6 まとめ	14
3.3 ひずみと亀裂の同時検出技術の高度化	16
3.3.1 目的	16
3.3.2 ひずみ・超音波計測システム	16
3.3.3 ひずみ計測実験	17
3.3.4 超音波を利用した亀裂検出実験	18
3.3.5 まとめ	20
3.4 FBG を用いた疲労亀裂進展モニタリング	21
3.4.1 目的	21
3.4.2 実験方法	21
3.4.3 実験結果	22

3.4.4	まとめ	27
3.5	FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術の今後の課題	30
第4章	FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術の実用化調査	31
4.1	実用化調査の目的	31
4.2	本年度の実施内容	31
4.3	実用化調査結果	32
第5章	関連技術の調査	36
5.1	計測結果の信号処理技術	36
5.1.1	信号処理の手順	36
5.1.2	ウェーブレット変換とサポートベクトルマシン	36
5.1.3	ウェーブレット変換とSVMを用いた損傷検知	37
5.1.4	まとめ	38
5.2	建物に適用したFBG センサによるひずみ計測	38
5.3	疲労センサを用いた寿命診断技術	40
5.3.1	はじめに（疲労診断ニーズと疲労センサの概要）	40
5.3.2	疲労センサの概要	41
5.3.3	寿命評価法	41
5.3.4	適用例	42
第6章	調査研究の成果	44
4.	調査研究の今後の課題および展開	46

1. 調査研究の目的

(1) 背景

高度成長期からバブル経済期にかけて産業・社会資本設備や構造物が利便性を求めて大量に製造・建設された。最近、これらの設備や構造物が老朽化し事故等の報告がされている。今後、これら設備の維持管理を費用的、技術的に適切な方法で行うことが求められている。

また、メンテナンス技術者が少子高齢化やリストラ等により減少し、これまでの経験に頼っていた技術の伝承が問題となっている。

このような中、材料や構造物の劣化や亀裂などの損傷を検知する機能を有した光ファイバ（FBG：Fiber Bragg Grating）センサを利用した鉄鋼構造物のひずみ・亀裂の同時計測技術は、劣化損傷検出および診断技術を高度化できる可能性を有しており、将来、この革新的な基盤技術の実現により、メンテナンス分野や計測機器分野における新産業の創出が図られ、機械工業の振興に資することが期待できる。

以上の状況により、光ファイバ（FBG）センサによりひずみと亀裂を同時に検出する技術の高度化が求められている。

(2) 必要性

劣化状態の検出には主として「ひずみ」と「亀裂」がある。「ひずみ」の計測は従来、ひずみゲージ等が主として使用され、最近は新技術として光ファイバによる計測が始まっている。「亀裂」の計測は目視、X線等種々行われているが、最近石油タンク等においてAE（アコースティックエミッション）による技術が開発されている。

今回の技術は、この「ひずみ」と「亀裂」を同時に1つの光ファイバセンサにて検出できる新しい技術であり、本技術が開発されれば小型、簡便、安価かつ劣化の進展監視ができ、安全性・信頼性の確保に資することとなる。

(3) 目的

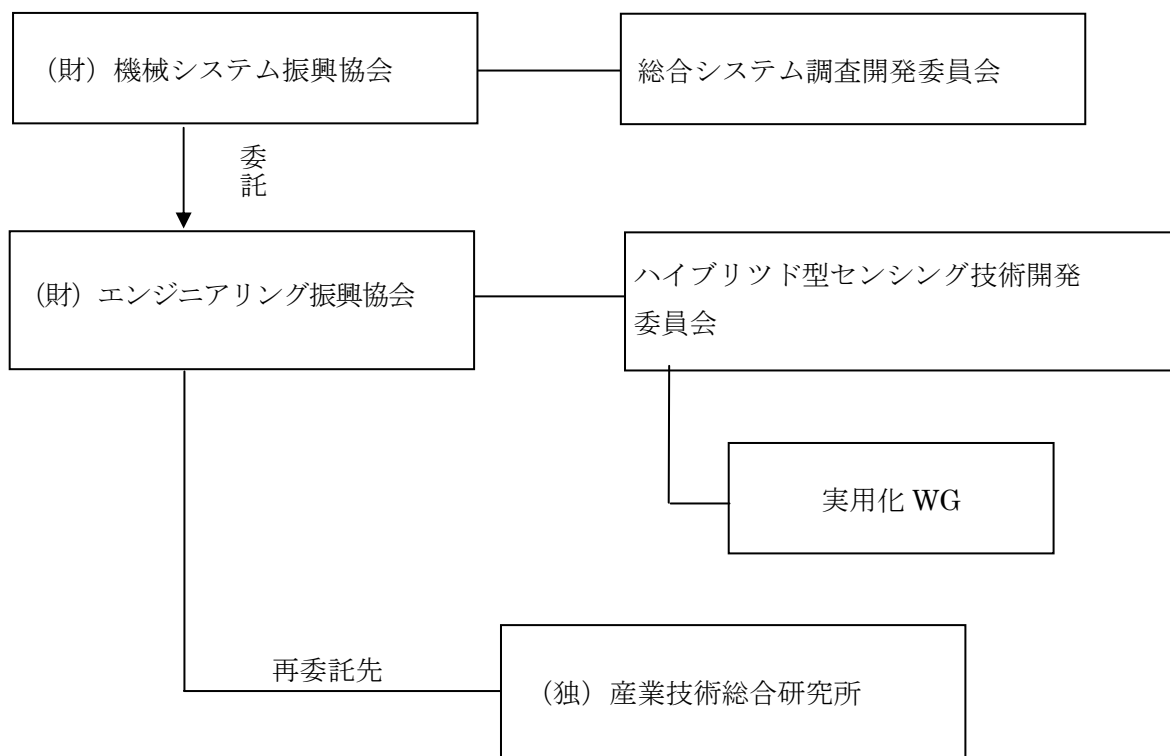
本年度の調査研究では、光ファイバ（FBG）センサにより鉄鋼材料におけるひずみと亀裂を同時に検出する技術および亀裂進展監視技術の実用化可能性について、以下を調査研究することを目的とする。

- ① 「ひずみ」と「亀裂」を同時に検出する技術の高度化に関する調査研究
- ② 亀裂進展監視技術の検討
- ③ 実用化に対する検討

2. 調査研究の実施体制

(財) エンジニアリング振興協会に産学官の有識者からなるハイブリッド型センシング技術開発委員会を設置し、本事業の運営と調査研究、開発計画作成、事業のとりまとめ等を実施する。委員会は東京大学、慶應大学、(財) 発電設備技術検査協会、(独) 産業技術総合研究所、川崎重工業㈱、石川島検査計測㈱、清水建設㈱などから構成する。

なお、本年度の実施項目のうち、ひずみと亀裂を同時に検出する技術の高度化と亀裂進展監視技術は、(独) 産業技術総合研究所に再委託して開発を実施した。



総合システム調査開発委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	放送大学 副学長	中 島 尚 正
委 員	政策研究大学院大学 政策研究科 教授	藤 正 巖
委 員	東京工業大学 大学院総合理工学研究科 知能システム科学専攻 教授	廣 田 薫
委 員	東京大学 大学院工学系研究科 助教授	藤 岡 健 彦
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携部門 コーディネータ	太 田 公 廣
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携部門 シニアリサーチャー	志 村 洋 文

ハイブリッド型センシング技術開発委員会名簿

◎委員長	東京大学 大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻 助教授	榎 学
委員	慶應義塾大学 大学院理工学研究科 開放環境科学専攻 教授	三 田 彰
委員	(財) 発電設備技術検査協会 溶接・非破壊検査技術センター研究グループ 主査	志 波 光 晴
委員	川崎重工業(株) 技術研究所 強度研究部 破壊強度グループ 主管研究員	村 岸 治
委員	清水建設(株) 技術研究所 企画部 開発企画グループ グループ長	柴 慶 治
委員	石川島検査計測(株) 研究開発事業部 技師長	荒 川 敬 弘
委員	(独) 産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門 構造体診断技術研究グループ 副部門長	秋 宗 淑 雄
委員	(独) 産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門 構造体診断技術研究グループ 主任研究員	高 坪 純 治

委員	(独) 産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門 構造体診断技術研究グループ 主任研究員	津 田 浩
オブザーバー	経済産業省 製造産業局 産業機械課 国際プラント推進室 室長	村 崎 勉
オブザーバー	経済産業省 製造産業局 産業機械課 国際プラント推進室 課長補佐	北 島 宏 樹
オブザーバー	経済産業省 製造産業局 産業機械課 国際プラント推進室 係長	新 田 渉
事務局	財団法人 エンジニアリング振興協会 研究理事	朝 倉 紘 治
事務局	財団法人 エンジニアリング振興協会 主任研究員	寺 園 道 雄
事務局	財団法人 エンジニアリング振興協会 課長	岡 本 晋

実用化 WG 委員名簿

(順不同・敬称略)

主査	石川島検査計測(株) 研究開発事業部 技師長	荒川 敬 弘
委員	(独) 産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門 構造体診断技術研究グループ 主任研究員	高坪 純 治
委員	清水建設(株) 技術研究所 企画部 開発企画グループ グループ長	柴 慶 治
委員	川崎重工業(株) 技術研究所 強度研究部 破壊強度グループ 主管研究員	村 岸 治
委員	大成建設(株) 技術センター 建築技術開発部 ニューフロンティア技術開発室 課長	今 井 博
事務局	財団法人 エンジニアリング振興協会 研究理事	朝 倉 紘 治
事務局	財団法人 エンジニアリング振興協会 主任研究員	寺 園 道 雄
事務局	財団法人 エンジニアリング振興協会 課長	岡 本 晋

3. 調査研究の内容

第1章 本報告書の概要

昨年度（財）エンジニアリング振興協会では、「ハイブリッド型センシング技術に関する調査研究」を（財）機械システム振興協会から受託して実施した。その結果、FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術について、実験による実施可能性の確認と実用化の可能性の検討を行ってきた。今年度は、昨年度と同じく機械システム振興協会から受託した、「FBG センサを利用した鉄鋼構造物のひずみ・亀裂発生・亀裂進展の同時計測技術に関する調査研究」の中で、本技術の基本となる要素技術の確認と実用化調査を実施した。

以下、本報告書（要旨編）の内容を概説する。

第1章（本章）では、本報告書の位置付けを説明するとともに、本報告書の各章に記述した内容の概要をごく簡単に示した。

第2章では、鋼構造物の高度メンテナンスにおけるセンシング技術と題して、（財）エンジニアリング振興協会が進めている高度メンテナンスシステム開発の中における本技術の位置付けと、既存のひずみ測定技術、亀裂測定技術、光ファイバによる測定技術に対する本技術の意義付けを行った。

第3章では、本年度の実施内容のうち、①「ひずみ」と「亀裂」を同時に検出する技術の高度化に関する調査研究、②亀裂進展監視技術の検討を行った結果を示している。これらの検討は、実験によって本システムの特性を把握することによる、このシステムの利点を明確にすることを目指して実施している。なお、本章ではこれらの検討を実施する前に超音波検出感度向上のためのシステム構築についても検討している。

第4章では、本年度の実施内容のうち、③ 実用化に対する検討の結果を示している。実用化に対する検討では、石油タンクや橋梁を有する事業者に、本システムを適用する場合にどのような改善が必要となるかを明確にするために行ったヒアリングの結果を整理している。

第5章では、関連技術の調査として、計測結果の信号処理技術、疲労センサを用いた余寿命診断技術および建物に適用した FBG センサによるひずみ計測について調査した結果を報告している。

第6章では、本調査研究の成果を整理している。

さらに、4. では今後の課題および展開をまとめ、来年度以降の開発に際して考慮すべき事項を整理している。

第2章 鋼構造物の高度メンテナンスにおける センシング技術について

現在、(財)エンジニアリング振興協会では、「構造物長寿命化高度メンテナンス技術開発」を実施中である。この技術開発は、平成13年度に実施した「堅牢な社会資本の構築に関する調査研究」からスタートし、平成14年度「産業・社会資本構造物に係る廃棄者のリデュースのための高度維持管理・メンテナンスの構築」により、技術戦略、学術戦略、人材戦略、産業戦略および行政戦略の5つの戦略が立てられた。また、平成15年度にはこの技術戦略の中で、基盤技術としての鉄鋼構造物センシング技術として、本報告書のテーマである、鉄鋼構造物を対象とした「ハイブリッド型センシング技術開発」(FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術開発)が始まった。平成15年度に実施した技術開発は、FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術開発の他に、「機械構造体等の次世代型非接触・非破壊検査システムの将来像に関する調査研究」、「機械システム等のメンテナンス最適化のための RBM(Risk Base Maintenance)手法の開発に関するフイジビリティスタディ」が行われ、コンクリート構造物のセンシング技術と鋼構造物のメンテナンス最適化に関する技術開発がスタートした。さらに、「産業基盤・社会基盤の維持管理高度化に関する調査研究」が実施され、先に述べた5つの戦略のうち、学術戦略、人材戦略、産業戦略について調査を行った。

平成16年度の「構造物長寿命化高度メンテナンス技術開発」では、平成15年度と同様に本テーマの他に、センシング技術としてコンクリートを対象とした「非破壊・非接触検査技術調査およびマルチスペクトル法技術開発」、センシングした結果を評価するための「機械システム等の RBM 手法の調査」、メンテナンス戦略構築のための「産業基盤・社会基盤の維持管理高度化に関する調査研究」を実施している。さらに、本年度から、診断技術開発として、「鋼構造物診断技術開発」と「コンクリート構造物診断技術開発」、今年度も調査中の RBM 手法を使用した「鋼構造物のリスク評価技術開発」およびメンテナンスに関する情報を有効活用する方策を探る「メンテナンス情報高度活用調査研究」が実施されている。

本開発項目である FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術は、FBG (Fiber Bragg Grating) センサを用いて、鋼構造物の「ひずみ」を測定するとともに、同時に「亀裂」などの損傷をセンシングする技術で、この技術が確立されると、センシングされた「ひずみ」と「亀裂」に関する情報から、鋼構造物診断技術を用いて構造物の健全性を診断し、さらに、RBM 手法による評価技術を用いて鋼構造物のリスクを評価することができるようになり、鋼構造物の高度メンテナンス技術が完成される。

鋼構造物の「ひずみ」と「亀裂」を個別に監視する技術は、既に開発されている。「ひずみ」を計測する技術は大変オーソドックスな方法ではあるが、ひずみゲージを使用した計測が良く用いられる。ひずみゲージを使用した場合、計測器メーカーの仕様によると、20% ($200,000 \times 10^{-6}$) 程度までのひずみは計測できることになるが、その耐久性は、特殊な加工を行っても1年程度と考えられる。これに対して本システムで使用する FBG をセンサの耐久性は格段に優れており、少なくとも10年オーダーの期間計測することが可能だと考えられる。

一方、「亀裂」監視技術については、目視による計測、超音波を利用した計測、磁粉探傷法など各種の表面探傷技術を利用した計測およびアコースティックエミッション (AE) を利用した技術など多

くの技術開発が進められている。これらの手法は、どの方法を使用するにしろ、センサが大きく、計測準備に手間がかかる、センサおよび計測システムが高額になるなどの理由から手軽に計測できるものではなく、限られた条件の時に計測が行われているだけであると考えられる。

こうした技術的な状況の中、現在開発中の「FBG センサを利用した鉄鋼構造物のひずみ・亀裂発生・亀裂進展の同時計測技術」は、光ファイバ（FBG）センサを利用して、1つのセンサで鉄鋼構造物のひずみを計測するとともに、亀裂の発生を検知し、さらに、亀裂の進展状況を監視するものであり、本開発技術は以下に示す利点を有すると考えられる。

- ① 光ファイバの一部を加工した FBG センサを用いているため、センサ部分が非常に軽量である。
- ② これまで亀裂計測に使用されてきた、たとえば、圧電素子に比べてセンサ部の大きさが小さく、局所的に超音波を計測できるため、これまでの手法に比べて超音波の立ち上がりのタイミングなどがより正確に検出できる。
- ③ MH_z オーダーの超音波についても計測可能である。
- ④ 腐食に強く耐久性に優れる
- ⑤ 配線が容易

この FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術が開発されれば、これまでより、安価に、簡便に、かつ、確実に鋼構造物の「ひずみ」と「亀裂」の状況が把握されることになり、鋼構造物の高度メンテナンス時に必要なセンシング技術が確立されることになる。

なお、光ファイバを利用した計測技術としては、FBG を使用する計測法の他に、BOTDR 法がある。BOTDR 法の利点は、①最大 10km までを 1本の計測線を用いて距離分解能 1m で計測可能、②ひずみ測定可能な最小ひずみは 40×10^{-6} 、③電気ノイズや雷に影響を受けない、④センサは腐食せず耐久性に優れる、⑤双方向から計測可能等があげられている。しかし、BOTDR 法では FBG による計測法に比べて、①距離分解能（ひずみが発生している位置の特定能力）や測定ひずみ限界が悪い、②計測機器が高い、③絶対ひずみ測定には不向き、④リアルタイム計測には不適、などの弱点がある。こうした状況の中、BOTDR 法は土木分野などでトンネル掘削時の変形・亀裂の計測や斜面の崩壊検知など、計測値の精度があまり必要とされないが、広域の大きな変形を検知することには優れていることから、こうした変形に対する警報システムとしての用途は考えられる。

今年度は、昨年度に引き続き、(財)機械システム振興協会から本業務を受託し、機械情報システムの研究開発の一環として実施しており、FBG センサを利用した鉄鋼構造物のひずみ・亀裂発生・亀裂進展の同時計測に関する基礎技術を開発するものである。今年度は、予定どおりの成果が得られたが、来年度以降、本技術の実用化に向けて研究開発を継続していく予定である。

本技術が開発された暁には、鋼構造物の、軽量、安価、簡便、確実なセンシングが可能となり、開発中の鋼構造物高度メンテナンス技術の一環として活用されることを望んでいる。

第3章 FBG センサを利用したひずみと

亀裂発生・進展の同時計測技術の開発

3.1 昨年度までの成果と本年度の実施概要

本章ではひずみ計測と亀裂計測のための超音波検出機能を併せ持つ FBG をセンサとしたひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術開発について記述する。本調査研究は平成 15 年度から始まり、本年度が 2 年目である。本年度の具体的な研究内容と成果を記す前に、本節で昨年度までの成果と本年度の実施概要を記す。

3.1.1 昨年度までの成果

構造物の欠陥検出に超音波が利用される場合がある。従来、圧電素子が超音波検出センサとして用いられてきた。近年、ファイバ・ブラッグ・グレーティング (FBG : Fiber Bragg Grating) をセンサとした超音波検出技術が開発され、その非破壊検査への適用が注目されている。光ファイバセンサの一種である FBG は小型・軽量で電磁波障害を受けないことや多重化可能なことから実用面で従来の圧電素子よりも大きなメリットがある。そこで、平成 15 年度には FBG による超音波検出と欠陥検出に関する基礎実験を行い、同センサの非破壊検査への適用性について下記の項目について検証した。

- ① 超音波発振モードと FBG センサの応答感度の関係
- ② 超音波検出波形に及ぼす超音波発振波長と FBG グレーティング長さとの関係
- ③ 人工欠陥を導入した試験片を用いた超音波非破壊検査試験
- ④ ひずみを与えた場合における超音波計測

3.1.2 本年度の実施概要

本年度は FBG による健全性評価システムの高度化を目的として、超音波検出の感度向上のためのシステム改良を行い、改良されたシステムを用いてひずみと亀裂の同時多点検出、疲労亀裂進展モニタリングへの適用を行った。本年度の実施概要は下記の通りである。

- ① 超音波検出感度向上のためのシステム構築
- ② ひずみと亀裂の同時検出技術の高度化
- ③ FBG を用いた疲労亀裂進展モニタリング

3.2 超音波検出感度向上のためのシステム構築

3.2.1 目的

欠陥の存在は超音波の伝搬特性に影響を与えることから、超音波を利用して構造体の欠陥を検出することができると考えられる。被検体への超音波伝搬はパルスレーザを照射する手法もあるが、現在のところ超音波発振子を被検体表面もしくは内部に取り付け超音波を発振させる手法が一般的である。伝搬してきた超音波に対する応答波の形状および強度などの特徴から欠陥の有無を評価することができる。このような超音波を利用して欠陥検出精度を高めるためには、超音波応答に対する感度をできる限り高めることが望ましい。

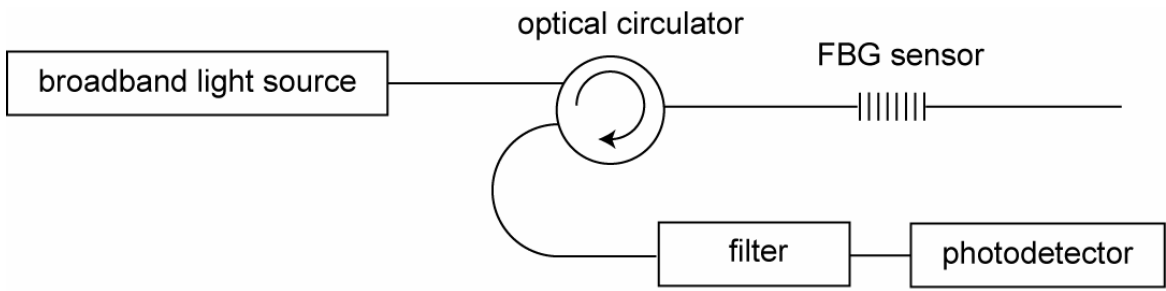
昨年度は広帯域光源を利用して FBG センサによる超音波検出を行った。広帯域光源による超音波検出においては、FBG センサからの反射光を光学フィルタに通し、その反射光と透過光の強度変化を超音波に対する応答として計測する。広帯域光源は数十～100nm 程度の範囲の出力波長分布を取るが、FBG の反射光分布は 0.2～1nm 程度に過ぎない。このため FBG の反射光は広帯域光源出力のうち、高々数%程度の光エネルギーを反射する程度となる。さらに、光学フィルタを通す必要があるため、光電変換器が検出する光エネルギーは広帯域光源出力の数%以下のごくわずかになる。このような低エネルギーの光強度検出においては大きな S/N 比の超音波応答信号を得ることは困難と考えられる。

そこで、本年度は光源にレーザを用いて、FBG センサの超音波応答感度を高めることを試みた。レーザ出力光は数百 THz 程度の周波数に対して数百 kHz 程度の周波数分布を取り、帯域が非常に狭く単色光と呼ばれる光である。このため FBG の反射波長域内の波長を有するレーザ光を入射すると、その波長における反射率から算出されるレーザ光が反射してくることになる。FBG が超音波を受けるとその反射光分布が微小に変化するため、反射光強度は超音波により微かに変化する。このようにレーザを光源とする超音波検出システムは発振波長における反射率分の出力光が FBG から反射されること、さらに FBG センサからの反射光をフィルタ処理する必要がないことから、広帯域光源を利用した場合と比較して光電変換器が検出する光強度は極めて強くなる。この場合、広帯域光源を利用した場合よりも超音波検出感度が向上することが期待できる。

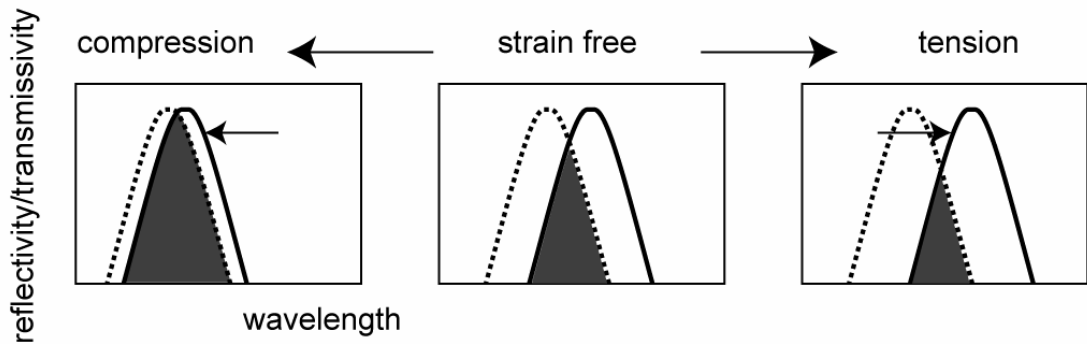
本章では広帯域光源とレーザ光源を利用した場合、光源の違いによる超音波検出感度の比較を行った実験結果を記す。最後に、レーザ光源を利用した超音波検出システムによる欠陥検出実験結果を記す。

3.2.2 広帯域光源を利用した超音波検出

図 3.2.2-1 に広帯域光源を利用した超音波検出システムとその原理図を示す。広帯域光源からの出力は光サーキュレータを介して FBG センサに入射される。FBG センサはブラッグ波長を中心とした狭帯域光を反射する。この場合の FBG センサからの反射光分布は図 3.2.2-1 (b) に示した原理図においては実線で表されるものとする。この時、点線のような透過率を有するフィルタに FBG センサからの反射光を透過させ、その透過光強度を光電変換器で電圧信号に変換する。フィルタ透過光強度は FBG センサの反射率とフィルタ透過率曲線が交差するグレーで色づけされた面積で表される。FBG が超音波を受けてそのブラッグ波長が変化することに伴い、フィルタ透過光強度が変化することになる。

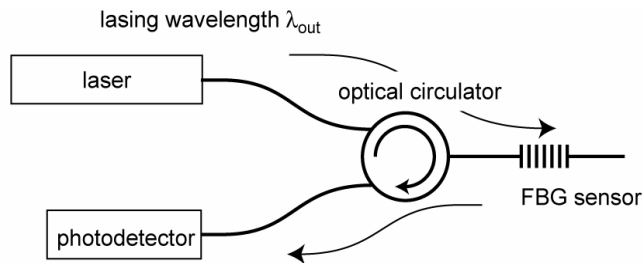


(a) ultrasonic detection system using broadband light source

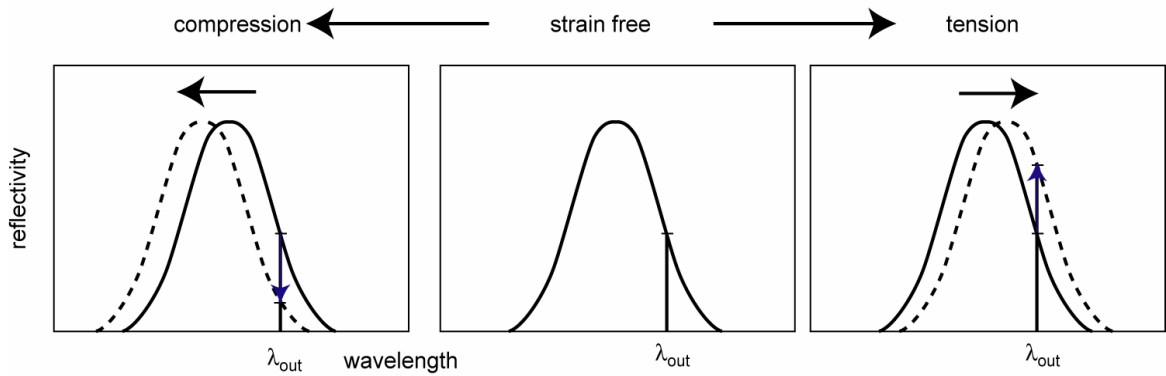


(b) variation in intensity of light transmitted through the filter with strain change

図 3. 2. 2-1 広帯域光源を利用した超音波検出システムとその動作原理



(a) ultrasonic detection system using laser light source



(b) variation in reflectivity at the lasing wavelength with strain change

図 3. 2. 3-1 レーザ光源を利用した超音波検出システムとその動作原理

3.2.3 レーザ光源を利用した超音波検出

図 3.2.3-1 にレーザ光源を用いた超音波検出システムとその原理図を示す。レーザ光源の発振波長 (λ_{out}) は図 3.2.3-1 (b) に示すように FBG センサの反射波長域 (図中実線で示す) にあり、かつ反射率-波長関係の変化勾配が急となる波長域に設定する。レーザ光は光サーキュレータを介して FBG センサに入射される。FBG センサからの反射光は光サーキュレータを通過して光電変換器に入射され、光強度が電圧に変換される。FBG が超音波を受けた場合、図 3.2.3-1 (b) に示すように FBG の反射波長の変化がもたらす反射特性変化によりレーザ発振波長における光強度が変化する。この原理から FBG センサが超音波を受けた場合の光強度変化が検出される。

光電変換器が検出する光強度は広帯域光源システムの場合と比較すると下記のような特徴がある。

レーザ光源の出力は非常に強力で、通常 mW オーダである。FBG センサの反射率-波長関係の変化勾配が急となる波長域付近にレーザ出力波長を設定する。このような波長においては反射率が通常、出力の 20~80% 程度になる。このため少なくとも数百 μW レベルの光が光電変換器に入射されることになる。広帯域光源を利用した場合は高々数十 μW 程度であるから、レーザ光源システムにおいて光電変換器はより高い強度の光を検出することになる。

3.2.4 光源の違いによる超音波検出感度の比較

直交積層炭素繊維強化エポキシ板に超音波発振子から発生させた超音波を伝搬させ、広帯域光源システムとレーザ光源システムを利用して FBG センサにより超音波発振子-センサ間距離を変化させ超音波を検出した。

超音波発振子-センサ間距離と S/N 比との関係を図 3.2.4-1 に示す。この図に示すように広帯域光源の場合、40~50dB であった S/N 比が、レーザ光源を利用することにより 70~80dB に向上したことがわかる。このように高強度光を光電変換器で検出するレーザ光源システムは広帯域光源超音波検出システムよりも超音波応答信号の S/N 比が高くなる。

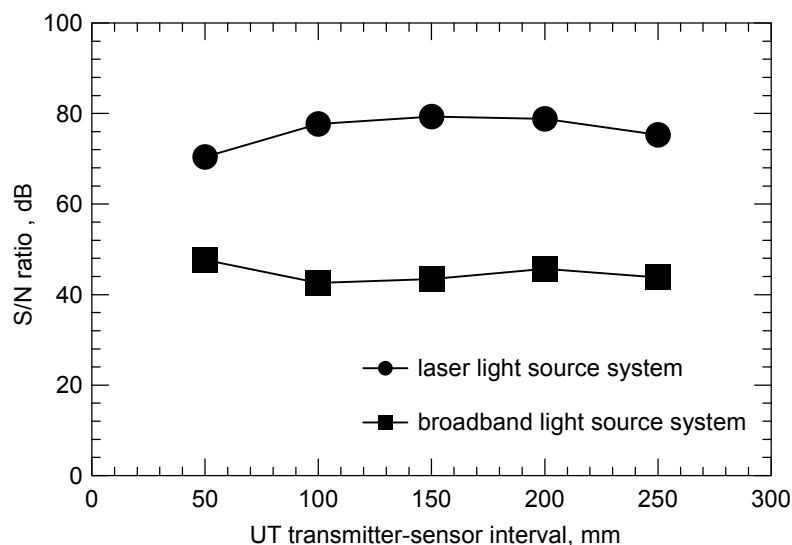


図 3.2.4-1 2つのFBG超音波検出システムの応答波形のS/N比

3.2.5 レーザ光源超音波検出システムによる欠陥検出

上記したようにレーザ光源を利用した超音波検出は広帯域光源を利用した場合よりも超音波検出感度を高めることができる。このため広帯域光源を利用した超音波検出システムよりも優れた欠陥検出能を有すると考えられる。ここでは従来、超音波を用いた欠陥検出にセンサとして多用されてきた圧電素子および FBG をセンサとして、広帯域光源とレーザ光源を用いた超音波検出システムによる欠陥検出を試み、それぞれの欠陥検出能を比較した。

図 3.2.5-1 に健全部と損傷部を通過した超音波に対する FBG センサと圧電素子の応答波形を示す。FBG センサの応答については、広帯域光源とレーザ光源を用いたケースの両者を示す。なお、応答信号の縦軸は各センサ応答の健全部を通過した超音波に対する初期応答振幅強度で正規化している。

圧電素子の応答波形を健全部通過の場合と損傷部通過の場合で比較すると、損傷部を通過した場合は応答強度が若干低下している。応答波形は超音波伝搬領域に関係なく類似した形状で、超音波伝搬領域の違いが応答波形形状に及ぼす影響は小さい。

一方、広帯域光を光源として利用した超音波検出システムを用いた FBG センサの応答はノイズの多い応答信号となるが、健全部通過の場合と損傷部通過の場合で明確な違いが現れている。つまり損傷部を通過した場合、健全部通過時よりも早い時間に応答が始まっている。この応答について考察する。本被検体の損傷部においては層間はく離があるために 0° 、 90° 層が分離している。超音波の伝搬速度は伝搬媒体のヤング率の平方根に比例する。このため損傷部において 0° 層を伝搬してきた超音波が、最も早く FBG センサに到着することになり、健全部通過時よりも応答開始時間が早くなったと考えられる。

レーザ光源を用いた場合の FBG センサの応答は広帯域光源を用いた場合の応答と比較するとノイズの少ない信号となる。この場合でも損傷部を通過した超音波に対する応答が早く始まり、試験時間 $7.3\mu\text{s}$ に最初の小さなピークが観察された後、一旦応答信号強度は低下する。試験時間 $8.3\mu\text{s}$ から再び応答信号強度は増加し、健全部通過時と同じ時間 ($10.2\mu\text{s}$) にピークに達する応答が現れる。試験時間 $8.3\mu\text{s}$ 以降に現れる大きな応答は超音波の伝搬時間から考慮して衝撃損傷部を迂回して健全部のみを通過してきた超音波に対する応答と考えられる。このようにレーザ光源システムを用いた FBG センサからは健全部と損傷部を通過した超音波に対して明らかに異なる超音波応答波形が検出され、従来欠陥検出に多用されてきた圧電素子よりも優れた欠陥検出能を有する超音波検出センサになることがわかった。

3.2.6 まとめ

ここでは広帯域光源とレーザ光源を使用した FBG 超音波検出システムによる応答検出を行い、下記のような結果を得た。

- ① 直交積層炭素繊維強化エポキシ板を伝搬媒体とした超音波検出においてレーザ光源システムは広帯域光源システムよりも応答信号の S/N 比を 20~30dB 向上させることができた。
- ② 直交積層炭素繊維強化エポキシ板の衝撃損傷を超音波探傷した。圧電素子による超音波検出では健全部と損傷部通過による応答波形の相違は応答強度のみに現れた。広帯域光源を用いたシステムと組み合わせた FBG センサからはノイズが多く含まれた応答信号であつ

たが超音波伝搬経路の相違により応答強度のみではなく、応答開始時間の相違が現れた。レーザ光源を利用したシステムと組み合わせた FBG センサではノイズのない損傷通過時の特徴が明確に現れる応答波形を示した。

③ FBG はレーザ光源システムとの組み合わせにより高感度超音波センサとして機能する。

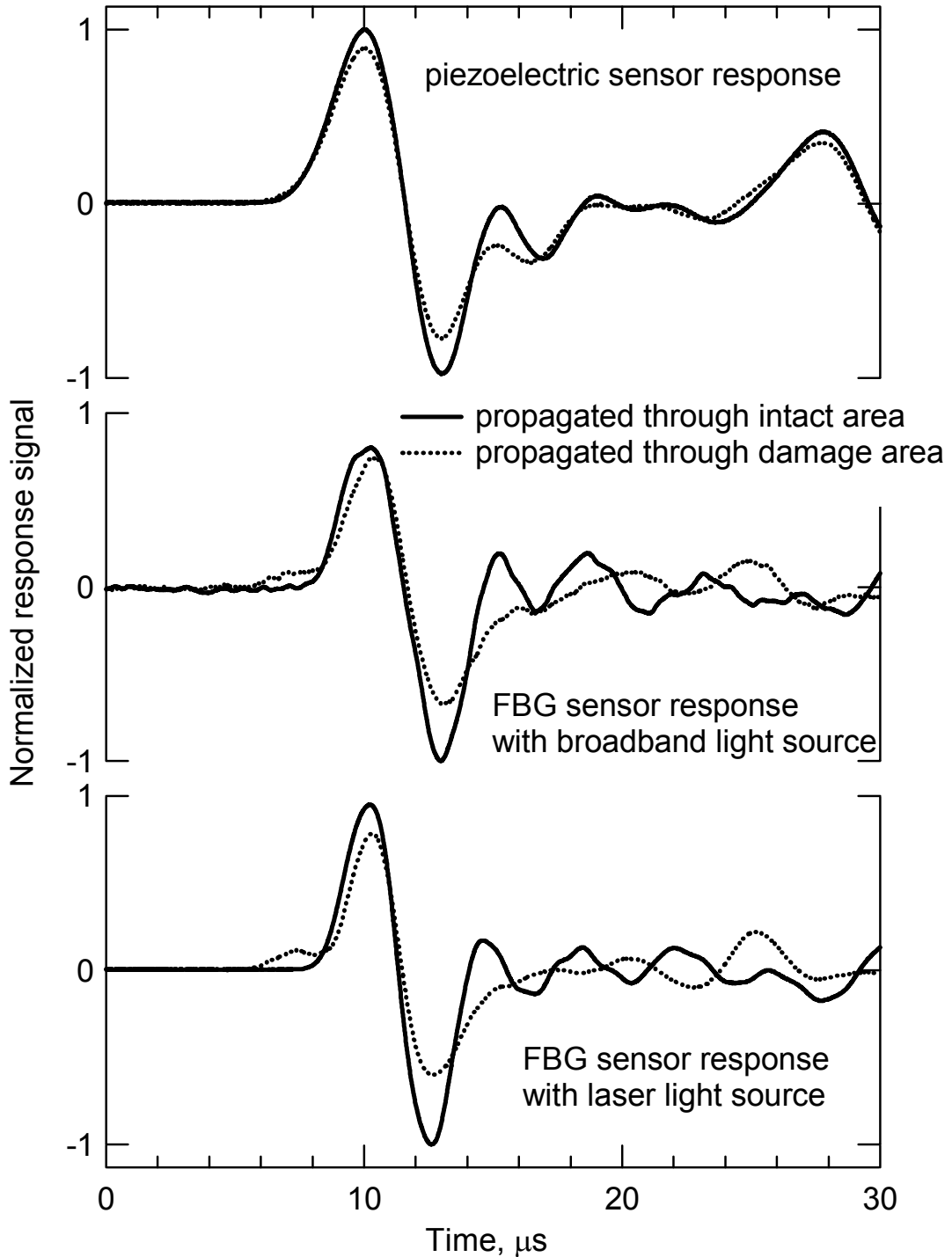


図 3. 2. 5-1 FBG センサと圧電素子による欠陥検出のための超音波応答の比較

3.3 ひずみと亀裂の同時検出技術の高度化

3.3.1 目的

異なるブラッグ波長を有する FBG センサ部を 1 本の光ファイバ上に設けたとき、異なる波長の反射スペクトルが得られる。波長分離技術を適用すれば、個々の FBG の反射光を分離して得ることができる。つまり 1 本の光ファイバに複数の FBG を配置して多点でひずみ・超音波を検出・計測することが可能になり、構造体健全性評価センサ網として簡便にすることができる。

本研究では 1 本の光ファイバ上に 2 個のブラッグ波長の異なる FBG センサを設け、波長分離技術を利用したひずみ計測および超音波を利用した亀裂検出を試みた。

3.3.2 ひずみ・超音波計測システム

本研究で構築した 2 チャンネルの FBG 超音波・ひずみ計測システムを図 3.3.2-1 に示す。システムは光源部、センサ部、超音波検出部とひずみ計測部に大別することができる。

① 光源部

光源としてひずみ計測時には広帯域光源を、超音波検出時には波長可変レーザ光源を用いた。

② センサ部

2 つのブラッグ波長の異なる FBG を直列接続してセンサ部を構成した。ここでは無ひずみ・室温環境下においてブラッグ波長が 1533nm の FBG1 とブラッグ波長が 1550nm の FBG2 を用いた。

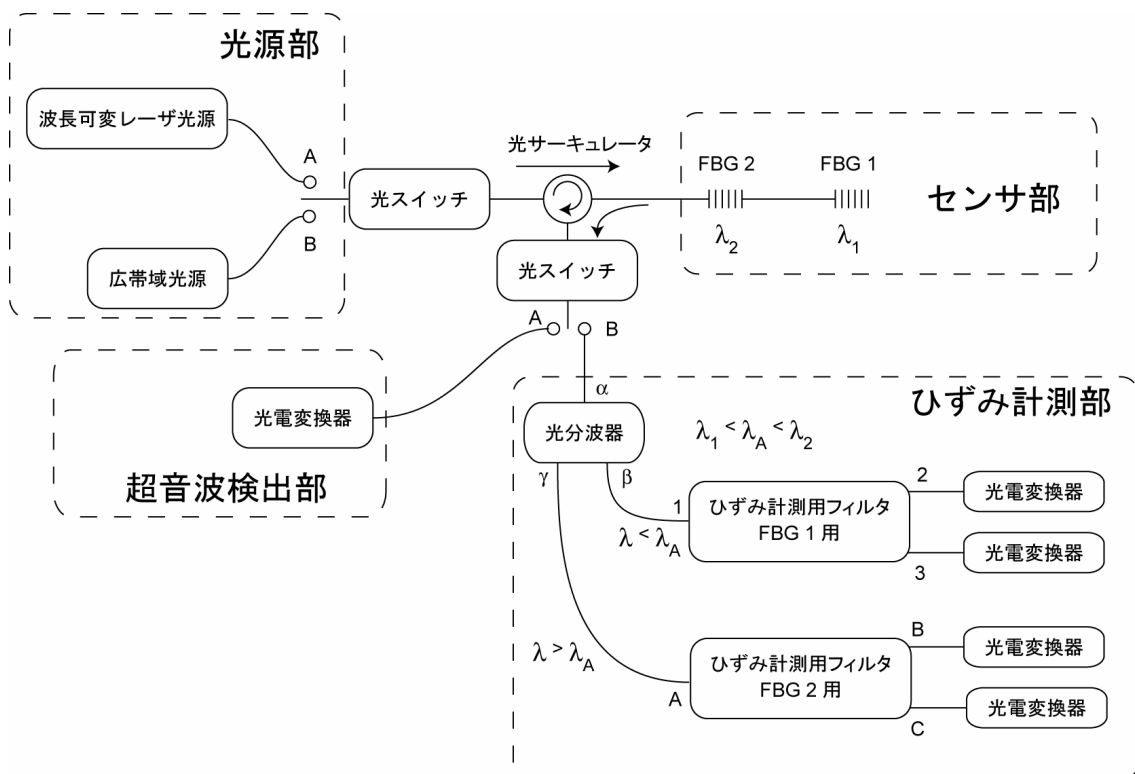


図 3.3.2-1 2チャンネル FBG 超音波・ひずみ計測システム図

③ ひずみ計測部

広帯域光を FBG に入射して、その反射光を光分波器に通し、2つの FBG からの反射光を波長分離し、それぞれ別ポートに出力する。それぞれの FBG からの反射光は、その後ひずみ計測用フィルタに入射され、フィルタ反射光と透過光として取り出し、光電変換器で光強度を測定し、その光強度からひずみを評価する。

④ 超音波検出部

レーザ光を FBG に入射しその反射光強度を光電変換器により測定することで超音波を検出する。

3.3.3 ひずみ計測実験

2チャンネルの FBG を用いて、片持ち梁の自由振動時のひずみ計測を試みた。

① 計測システムと試験片

光サーキュレータからの反射光は光分波器に入射される。光分波器のポート α から入射された光は出力ポート β と γ から FBG1 と FBG2 の反射光を分離して取り出すことができる。光分波器の各ポートからの出力光をひずみ計測用フィルタに通す。FBG1 と FBG2 用のフィルタはそれぞれの無ひずみ・室温におけるブラッグ波長を中心に $\pm 3\text{nm}$ の範囲で透過するとともに反射率の異なる光学特性を有する。ひずみ計測用フィルタの各出力ポートからの光を光電変換器に入射して、出力光強度を電圧信号に変換した。

図 3.3.3-1 に示すように、直列接続された FBG1 と FBG2 をステンレス薄板に直線上に貼り付けた。また FBG センサに隣接する位置にひずみゲージも貼り付けた。用いた FBG のグレーティング長は 10mm で、ひずみゲージのゲージ長も 10mm である。

② キャリブレーション

FBG を用いたひずみ計測においては光強度－光電変換器出力関係を予め評価しておく必要がある。また、光コネクタの接続状態が光電変換器出力電圧に及ぼす影響をキャンセルするため、ひずみ計測用フィルタの 2 つの出力ポートにおける光強度から算出される無次元量 R を用いてひずみ－ R 関数を評価する。

①で説明した図 3.3.3-1 に示す 2チャンネルの FBG センサと抵抗式ひずみゲージを貼り付けた片持ち梁に自由振動を加え、その際の光電変換器出力をオシロスコープに 5ks/s で収録してひずみを評価した。抵抗式ひずみゲージは FBG センサの出力結果を確認するため FBG センサの隣に貼り付けた。光電変換器出力から評価した FBG1 で計測されたひずみと並んで設置したひずみゲージで計測された結果をそれぞれ図 3.3.3-2 に示す。

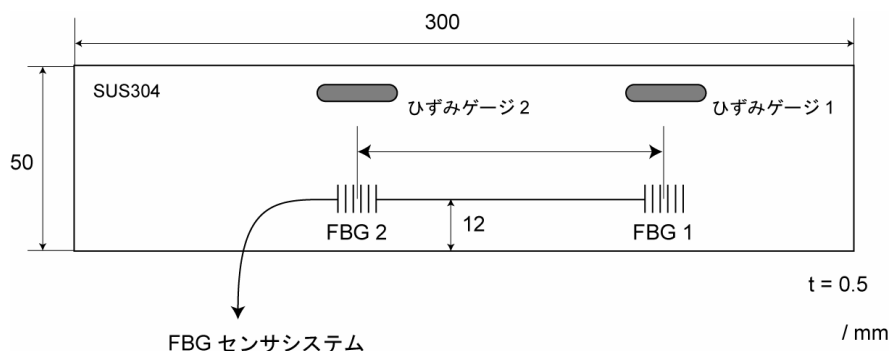


図 3.3.3-1 ひずみ計測試験片へのひずみゲージと FBG センサの取り付け

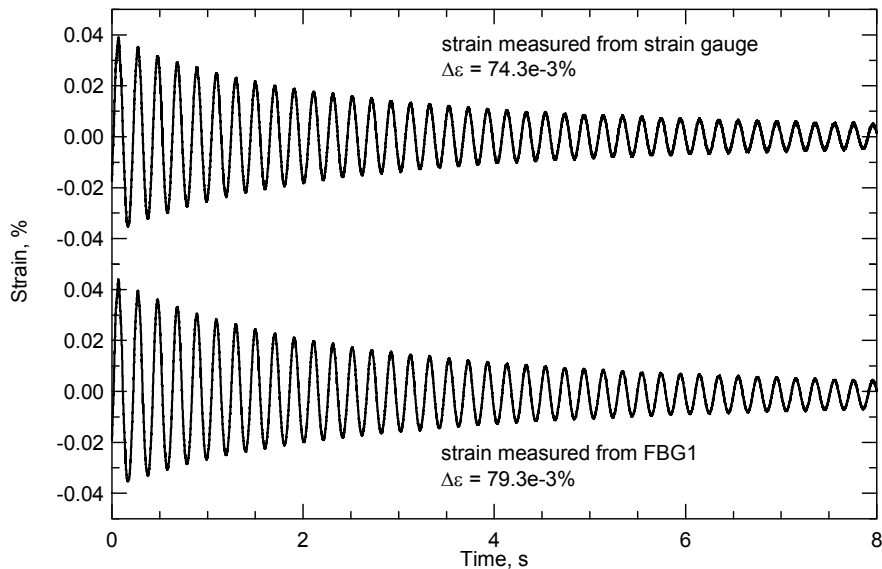


図 3.3.3-2 FBG1 とひずみゲージから評価された片持ち梁の自由振動時のひずみ変化

両センサから評価されるひずみの値は非常に近い。また、同じ振動周期を示していることが確認される。このように波長分離技術の適用により多チャンネル FBG によるひずみ計測が可能であることがわかった。

3.3.4 超音波を利用した亀裂検出実験

スリット亀裂を入れたステンレス薄板に直列接続した 2 チャンネルの FBG を貼り付け、超音波を利用して亀裂検出を行った実験を紹介する。波長可変レーザ光源の出力波長をそれぞれの FBG センサの反射波長内に設定し、個々の FBG が受信した超音波応答を計測した。

①計測システムと試験片

図 3.3.2-1 に示したシステムの波長可変光源、センサ部および超音波検出部を使って亀裂検出実験を行った。センサと試験片は 3.3.3 で行ったひずみ計測実験で使用したものと同じで、図 3.3.4-1 に示すように長さ 25mm のスリットをステンレス薄板に入れる前と後で超音波発振子から発生させた超音波に対する FBG1 と FBG2 の応答信号を収録した。用いた超音波発振子は直径 6mm、中心周波数 5MHz の圧電素子とした。圧電素子にはスパイク波を入力して、ステンレス板に面外方向変形が生じる超音波を発生させた。超音波発振子は図に示すように FBG1 の左 50mm の場所（この位置に配置した超音波発振子を超音波発振子 A と呼ぶことにする）に、また、FBG2 から左に 50mm の場所（この位置に配置した超音波発振子を超音波発振子 B と呼ぶことにする）に配置した。なお、この圧電素子を用いてスパイク波入力された超音波の伝搬速度は 5,460m/s であった。

②超音波発振子 A から発振した超音波に対する応答

図 3.3.4-2 に超音波発振子 A から発振した超音波に対する FBG2 のスリット（亀裂）導入前後の応答信号の立ち上がり部を示す。この図では、スリット導入後の応答は拡大しているの、スリ

ット導入前と同じような応答に見えるが、振幅はスリット導入前に比べて小さく、応答が微弱になっている。スリット導入後の超音波発振子 A-FBG2 間距離は式(3.3.4-1)で与えられる。

$$\sqrt{20^2 + 13^2} + \sqrt{30^2 + 13^2} = 56.55\text{mm} \quad (3.3.4-1)$$

スリット導入により 6.55mm だけ超音波伝搬距離が伸び、音速 5,460m/s から 1.2 μs 応答遅れが生じると計算される。スリット導入により約 1.1 μs の応答遅れがあり、予想される時間遅れと良く一致した。

③超音波発振子 B から発振した超音波に対する応答

超音波発振子 B から発振した超音波に対するスリット導入前後の FBG 1 の応答信号を **図 3.3.4-3** に示す。スリット導入前は超音波伝搬距離 150mm でも明確な立ち上がりを示している。立ち上が

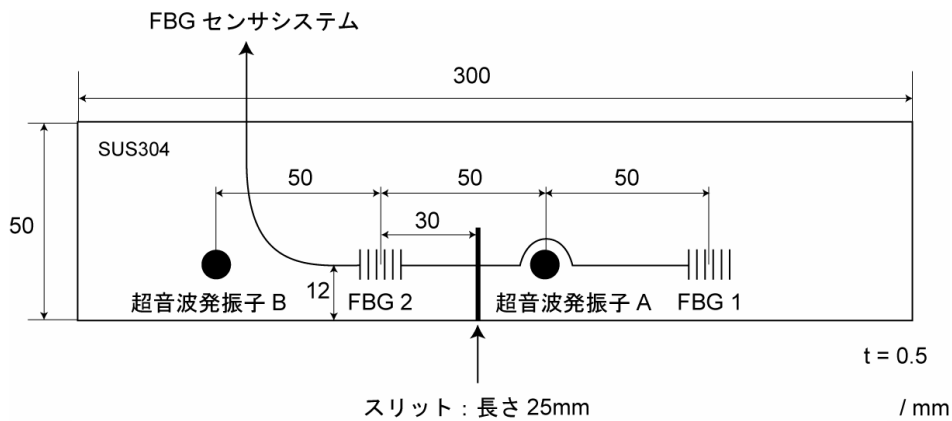


図 3.3.4-1 超音波を利用したき裂検出実験に用いた試験片

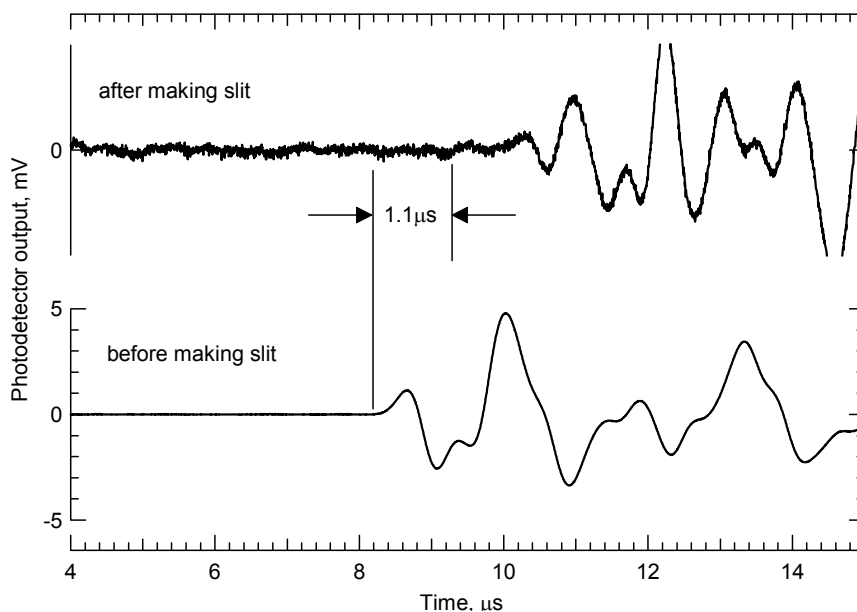


図 3.3.4-2 FBG2 のスリット（亀裂）導入前後の応答信号立ち上がり部の拡大（超音波発振子 A から超音波を発振したケース）

り時の応答はスリット導入により小さくなった。また、スリット導入時はスリットを迂回することになるので、発振子-センサ間距離は式 (3.3.4-2) で与えられる。

$$\sqrt{80^2 + 13^2} + \sqrt{70^2 + 13^2} = 152.2\text{mm} \quad (3.3.4-2)$$

したがって 2.2mm スリット導入により伝搬距離が伸びたことになる。音速 5,460m/s から計算される時間遅れは 0.4 μs で、計測された時間遅れ 0.5 μs と良く一致する。

3.3.5 まとめ

ここでは2つの FBG センサを直列に接続して、波長多重技術を利用して個々の FBG をひずみセンサもしくは超音波センサとして機能させる実験を行った。そして下記のような結果を得た。

- ① 直列接続した FBG からの反射光を光フィルタの一種である光分波器を用いて個々の FBG からの反射光に分離して取り出すことができた。
- ② FBG から評価されるひずみは金属抵抗ひずみゲージから評価されたひずみと良い一致を示した。波長分離技術の適用により、2 チャンネルの FBG センサを用いて同時にひずみを計測することができた。
- ③ FBG を超音波センサとして亀裂を検出することができた。波長可変レーザを用いて発振波長を変化させることにより計測の対象となる FBG を選択することができた。
- ④ 図 3.3.2-1 に示したシステムの光スイッチを切替えることで複数チャンネルの FBG をセンサとしたひずみ計測と亀裂検出のための超音波計測が可能なることを実証した。

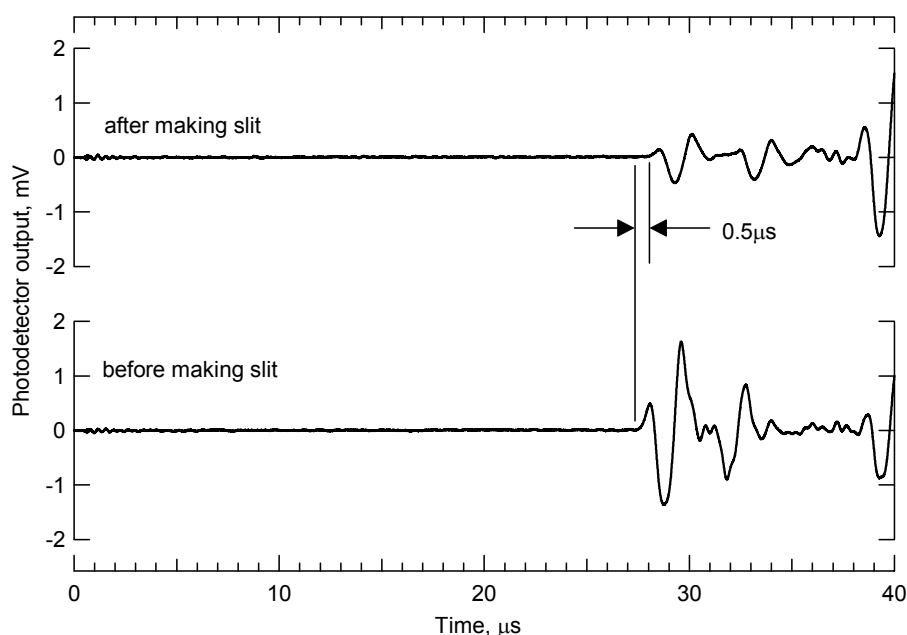


図 3.3.4-3 超音波発振子 B からの超音波に対する亀裂導入前後の FBG1 の応答信号

3.4 FBG を用いた疲労亀裂進展モニタリング

3.4.1 目的

長期に渡る構造物の使用中には繰り返し負荷が加わり、疲労亀裂が進展することが知られている。金属材料の中で特に航空・宇宙構造物材料として利用されるアルミ合金は鉄鋼材料と比較すると疲労亀裂進展が速いことが知られている。このため航空機などでは疲労亀裂の検出は信頼性確保の観点から非常に重要な検査項目になっている。疲労亀裂進展は染色塗料などを用いて目視による観察などが行われているが、定期的に人間が検査を行う必要があり、大きな労力を要する検査項目となっている。

もし、疲労亀裂発生が想定される箇所付近に FBG センサと超音波発振子を貼り付け、超音波応答の変化から疲労亀裂進展がモニタリングできれば、構造物として稼働中に検査が可能で、構造体の健全性の確認に要する手間、時間は大幅に短縮されると考えられる。超音波発振子から超音波を発振させ、その応答波形を収録し、その変化から構造物の健全性を評価する検査法はアクティブ・センシングと呼ばれている。アクティブ・センシングは、これまで圧電素子を超音波発振子およびセンサとして使用して行われてきた。もし超音波センサを FBG とすることができれば、波長多重化技術を利用してセンサ網は非常に単純になる。また電磁波障害を受けないことや FBG センサが軽量、小型なことからセンサの実装においても圧電素子よりも実用的であると考えられる。

本研究では FBG を超音波センサとしたアクティブ・センシング技術による疲労亀裂進展モニタリングの可能性について調べた。被検体としてオーステナイト系ステンレス SUS304 を用いて、圧電素子により被検体に超音波を発生させ疲労亀裂進展に伴う超音波応答信号の変化を調べた。

3.4.2 実験方法

疲労亀裂進展試験で使用した試験片を図 3.4.2-1 に示す。300×50×4mm の長手方向中心部の片端に 5×5mm のノッチを疲労予亀裂として加工した。超音波を発振させるために用いた超音波発振子は直径 5mm で約 600kHz を共振周波数とする圧電素子である。超音波発振子と同じ圧電素子を超音波センサとして用いて、スパイク波入力時に計測された超音波の音速は 5,430m/s であった。

疲労亀裂進展試験において、超音波センサとしてグレーティング長 10mm の FBG を用いた。超音波発振子と FBG センサの取り付け位置は図 3.4.2-1 に示す通りである。超音波検出用 FBG (これを FBG2 と名付ける) のファイバ軸上で 30mm 離れた箇所に超音波発振子を取り付けた。また FBG2 のファイバ軸に平行に 5mm 離れた箇所に超音波検出用 FBG を貼り付けた (予亀裂に近い側と離れた側をそれぞれ FBG1 および FBG3 と名付ける)。試験片へ貼り付け後の FBG センサの、疲労試験前の反射特性から、いずれの FBG も半値幅が 0.23nm で、無負荷の状態では 1550.1~1550.2nm のブラッグ波長を有することがわかった。

この試験片を用いて疲労亀裂進展試験を行い、予亀裂先端から疲労亀裂を進展させ、超音波発振子から励起された超音波に対する各 FBG センサの応答を収録した。疲労亀裂進展試験の条件は下記の通りである。

- ① 繰り返し周波数 : 10Hz
- ② 応力比 : 0.1

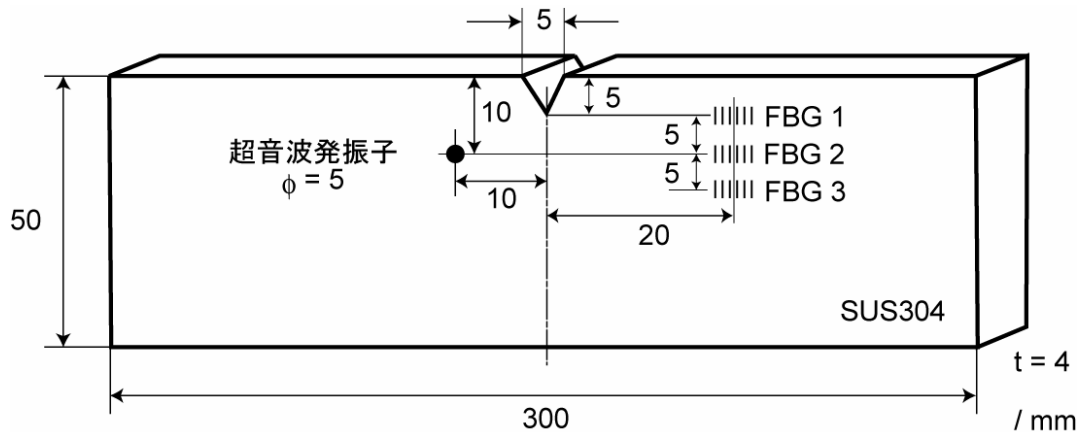


図 3.4.2-1 疲労亀裂進展モニタリングに用いた試験片形状と超音波発振子と FBG センサの取り付け位置

③ 最大疲労荷重：35kN~50kN

④ 温度 25℃、湿度 50%

疲労亀裂長さはビデオマイクロスコープによる観察を行い測定した。疲労亀裂が予亀裂先端からそれぞれ 1、3、5、7、9、11mm 進展した時に疲労試験を中断し、疲労荷重の最大負荷をかけたとき（疲労亀裂開口時に対応）と負荷をゼロとしたとき（疲労亀裂閉口時に対応）の 2 つの状態超音波応答計測を行った。超音波発振のため、発振子にはスパイク波と 200、400、600、800kHz のトーン・バースト波（5 周期）を送り、超音波を発生させた。超音波計測システムは波長可変レーザを光源とするシステムで、超音波応答収録条件はサンプリング速度 250MS/s もしくは 500MS/s で、512 回の平均化処理を行った。FBG による超音波検出では、ファイバ軸方向から伝搬する超音波に対する感度が高く、ファイバ軸の垂直方向から伝搬する超音波に対しては極めて感度が低下する。この試験では試験片長手方向から伝搬して端面反射された超音波が FBG センサに到達するまでの伝搬距離は最低でも 300mm ある。音速から計算される端面反射波到達時間は約 $55 \mu s$ である。そこで本研究では端面反射波による影響を避けるため、すべての応答検出時間を $40 \mu s$ 以内とした。疲労亀裂進展にともなう超音波応答信号の応答波形（振幅および波形形状）と到達時間変化を調べた。

3.4.3 実験結果

1) 亀裂開口時と亀裂閉口時の応答の比較

スリットのような完全に分離した欠陥の場合、超音波は欠陥部を迂回して伝播するが、疲労亀裂のような亀裂面同士が接触しているような欠陥の場合、超音波は欠陥部を透過して進展することが知られている。このため超音波による疲労亀裂の検出は一般に亀裂が閉じると困難とされている。そこで本実験では疲労亀裂が開いている時と閉じている時の 2 つの場合で超音波応答を計測し、両者を比較して疲労亀裂検出に及ぼす亀裂開口状態の影響を調べた。ここでは疲労試験において最大疲労荷重を負荷した場合を亀裂開口時、負荷荷重をゼロにした場合を亀裂閉口時として超音波応答を計測した。

一例として FBG2 の 800kHz のトーン・バースト波に対する亀裂開口時と閉口時の応答をそれ

ぞれ図 3.4.3-1 と図 3.4.3-2 に示す。なお、この図においては FBG2 軸上に亀裂が到達したときを 0mm として、疲労亀裂進展が生じていない状態を -5mm、予亀裂先端から疲労亀裂が 11mm 進展した状態を 6mm として表示している。また各応答波形は最大値で正規化している。

(1) 亀裂開口時における応答 (図 3.4.3-1 参照)

疲労亀裂が FBG2 のファイバ軸上まで進展するまでの応答(パラメータ-5、-4、-2mm の 3 種)には超音波応答開始時間に目立った差は観察されない。FBG2 の軸上まで疲労亀裂進展が到達したパラメータ 0mm において、若干ではあるが応答に遅れが生じていることが確認される。その後、FBG2 軸を越えて、さらに疲労亀裂が進展すると超音波応答の遅れが大きくなることが観察される。このような応答の遅れは超音波励起信号の種類に依存せず観察された。

また、試験時間 9.5 および 10.8 μ s では亀裂進展前に応答信号は最大値を取ったが、パラメータ 6mm では最小値になっている。亀裂が FBG2 の軸上から 6mm まで進展したことにより、800kHz のトーン・バースト波入力に対して、応答信号が亀裂進展前と比較して半周期だけ遅れたことになる。

(2) 亀裂閉口時における応答 (図 3.4.3-2 参照)

図 3.4.3-2 は、亀裂開口時の超音波応答である図 3.4.3-1 に対応する亀裂閉口時の超音波応答である。亀裂進展に伴う応答開始時間の変化は観察されない。トーン・バースト波入力の場合は応答 4 または 5 周期目で応答に亀裂開口時と同様に遅れが現れる。しかし、遅れ時間は亀裂開口時と比較して小さい。

図 3.4.3-2 からわかるように亀裂進展に伴い初期応答開始時には変化が現れないが、3 周期目以降からは亀裂進展に伴い応答に遅れが生じる。要旨編には示していないが、200kHz のトーン・バースト波入力よりも 800kHz のトーン・バースト波入力に対する応答の遅れが大きい。このことから、亀裂が閉口している場合は高い周波数のトーン・バースト波を入力した方が疲労亀裂進展をモニタリングし易い。

(3) 亀裂閉口時と亀裂開口時の応答の比較実験結果のまとめ

以上の実験結果から下記のようにまとめることができる。

- ① FBG を超音波検出センサとした亀裂進展モニタリングは可能である。
- ② 亀裂進展に伴い、超音波応答には遅れが現れ、応答強度が低下する。
- ④ トーン・バースト波入力に対する超音波応答は亀裂進展に伴い遅れのみが生じ、波形形状変化は観察されなかった。
- ⑤ 亀裂閉口時と開口時における超音波応答を比較した結果、亀裂進展に伴う応答の変化と応答遅れは亀裂開口時において明確に現れる。
- ⑥ 本実験では FBG センサのファイバ軸から 2mm 亀裂が進展した時、亀裂進展に伴う応答遅れや波形形状変化を亀裂開口時において明確に検出することができた。
- ⑦ 亀裂閉口時においては高い周波数のトーン・バースト波を用いた方が亀裂進展モニタリングがし易かった。

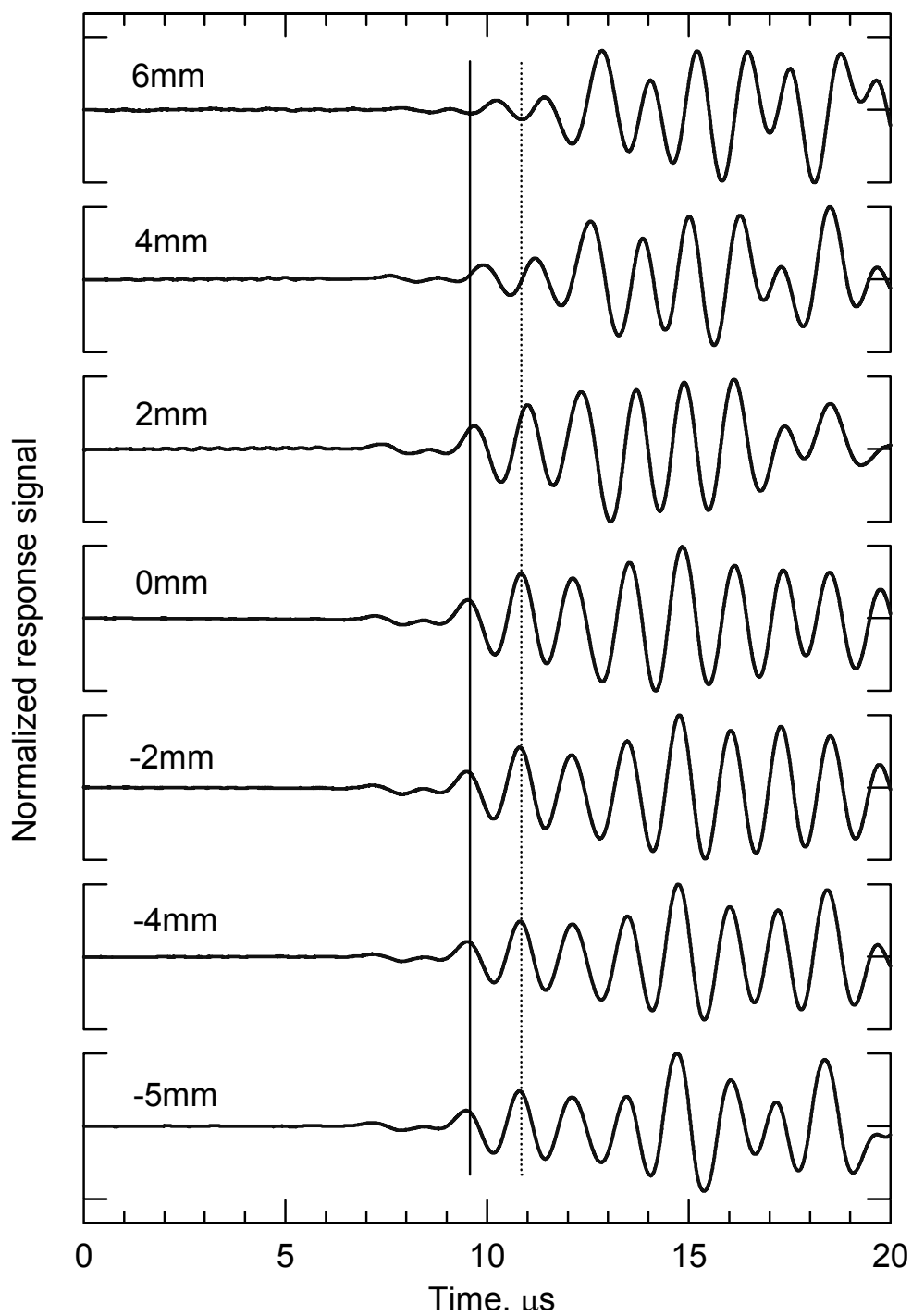


図 3.4.3-1 FBG2 の亀裂開口時の 800kHz トーン・バースト波入力に対する応答

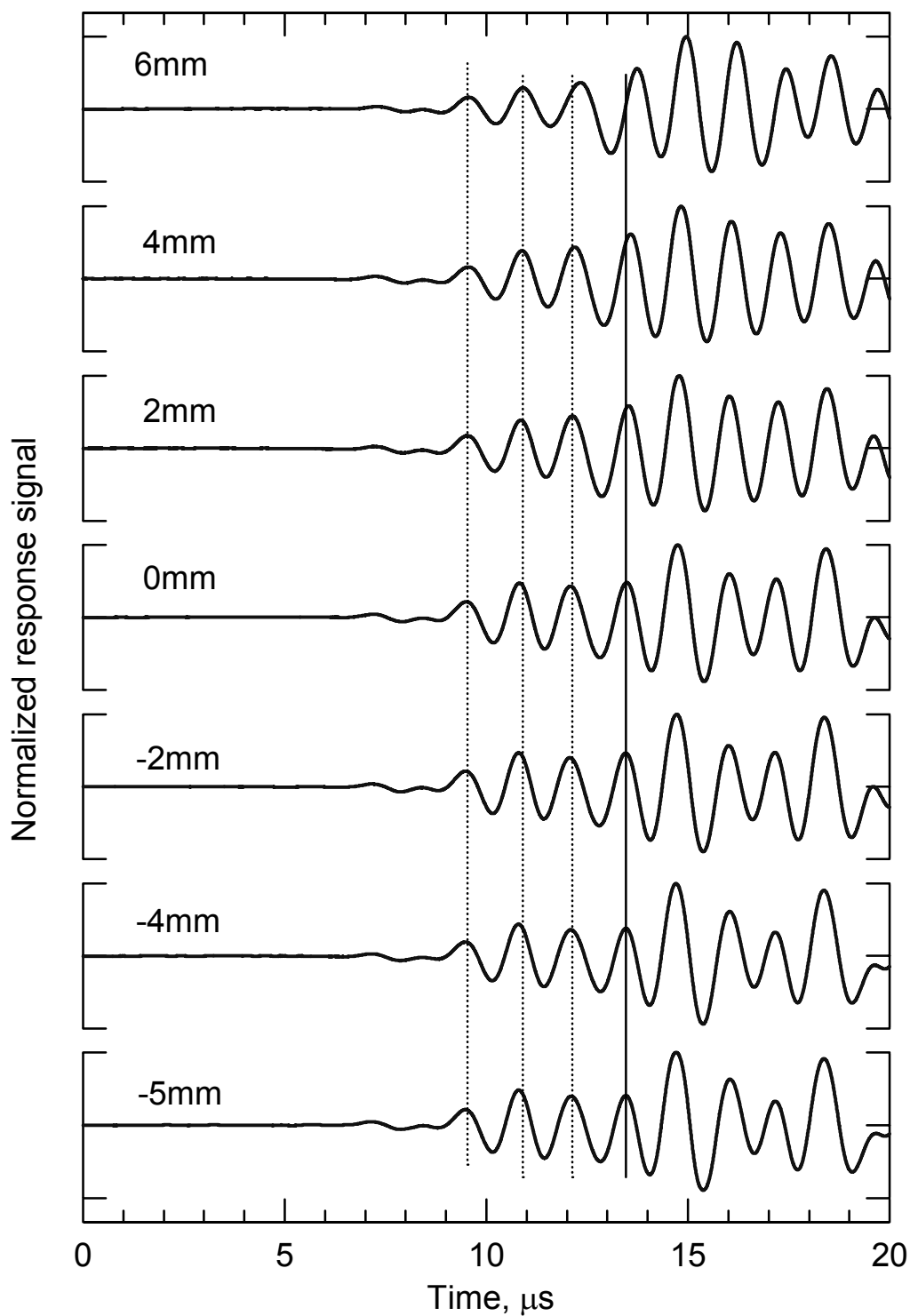


図 3. 4. 3-2 FBG2 の亀裂閉口時の 800kHz トーン・バースト波入力に対する応答

2) 亀裂進展と応答波形の遅れとの関係

(1) 亀裂開口時

亀裂開口時には応答波形の遅れが閉口時と比較して大きく現れることから容易に亀裂進展をモニタリングすることができる。亀裂開口時におけるスパイク波、200～800kHzのトーン・バースト波を超音波発振子励起信号として応答波形を検出した。各超音波発振子励起信号により励起された超音波に対する応答の亀裂進展に伴う遅れを調べた。

本研究では初期応答立ち上がりに現れたピーク発生時間の亀裂進展に伴う変化を調べた。亀裂進展前(パラメータ・5mmの場合)の初期応答立ち上がりの時点における亀裂進展に伴う対応するピークの遅れを計測した結果を図3.4.3-3に示す。亀裂進展に伴う時間遅れが最も大きく現れたのは200kHzのトーン・バースト波信号を超音波励起信号に用いた時であった。トーン・バースト波入力の場合、周波数が高くなるに従い亀裂進展に伴う時間遅れは減少する傾向にあった。この結果から低周波のトーン・バースト波を超音波励起信号に利用した方が亀裂検出には有利と言える。

一方、周波数が低くなると周期が長くなるので、応答遅れが大きくなったと考えられる。つまり、応答遅れは信号周期に比例して大きくなるものと考えられる。そこで各信号の時間遅れをその周期で割った比の値と亀裂進展長さとの関係を求め、図3.4.3-4に示した。この時間遅れと周期の比は逆に800kHzのトーン・バースト波入力において、亀裂進展に伴う影響が大きく現れた。

実際の計測においては亀裂進展に伴う応答遅れが大きく現れた方がモニタリングしやすい。亀裂開口時に低周波トーン・バースト波を超音波励起信号に用いて、亀裂進展モニタリングすべきである。

(2) 亀裂閉口時

疲労亀裂は閉口時、亀裂面同士が接触し合っているために超音波が健全部材と同様に透過伝搬することが知られている。このため、超音波を利用した亀裂閉口時の疲労亀裂検出は非常に困難とされている。しかし、亀裂面では力学特性を決める境界条件の不連続性などの影響から、閉口時にも超音波伝搬に影響を及ぼすと考えられる。そこで、亀裂閉口時、本研究では負荷をゼロとした場合に、FBGセンサが検出した超音波応答波形の亀裂進展に伴う時間遅れを評価した。

FBG2が検出したそれぞれのトーン・バースト波入力に対する応答信号の亀裂進展前(パラメータ・5mm)に現れたピークを基準として、亀裂進展に伴うピークの発生時間遅れを評価した。なお、亀裂開口時は超音波に対する応答開始直後に現れたピークのずれを評価したが、3周期目以降の応答の遅れを調べた。

亀裂閉口時の亀裂進展に伴う応答時間の遅れを図3.4.3-5に示す。この場合、亀裂進展が応答時間遅れに最も影響を与えたのは800kHzトーン・バースト波入力の場合であった。また、スパイク波入力の場合は亀裂進展に伴い、応答信号が比例して遅れている。このような亀裂進展に伴う応答の遅れは亀裂進展モニタリングにおいては理想的である。

応答遅れと亀裂長さに伴う応答開始の時間遅れを信号周期で割った値との関係を図3.4.3-6に示す。この場合、800kHzトーン・バースト波入力の場合が最も亀裂進展の影響を大きく受ける結果となった。また200～600kHzまでのトーン・バースト波入力の場合は大きな差が見られなかった。

(3) 亀裂進展と応答波形の遅れとの関係のまとめ

以上の結果から亀裂進展と応答波形の遅れとの関係をまとめると下記の通りである。

- ① 亀裂開口時は 200kHz トーン・バースト波入力に対する超音波応答において亀裂進展に伴う時間遅れが大きく現れた。しかし時間遅れに対する信号周期の比を取り、亀裂長さとの関係进行评估すると、その結果は周波数には大きく依存しない関係を示した。
- ② 亀裂閉口時は 800kHz トーン・バースト波入力に対する超音波応答において亀裂進展に伴う時間遅れが大きく現れた。また、応答時間遅れの信号周期に対する比の値と亀裂長さの関係も 800kHz トーン・バースト波入力に対する応答が最も大きな変化を示した。
- ③ 以上のことから、亀裂開口時は低周波トーン・バースト波入力により亀裂進展は大きな応答時間遅れとなって検出できる。また、亀裂閉口時は高周波トーン・バースト波入力により亀裂進展をモニタリングできると考えられる。

3.4.4 まとめ

FBG を超音波検出センサとしてアクティブ・センシング技術による疲労亀裂進展モニタリングの可能性について検証した。これらの実験は以下のようにまとめられる。

- ① FBG をセンサとしたアクティブ・センシングにより疲労亀裂進展モニタリングは可能である。
- ② FBG は圧電素子と比較して形状が小さいことから亀裂進展状況を精度良くモニタリングできると考えられる。今回の実験では 2mm 毎に亀裂が進展した状態で FBG により超音波応答変化を調べた。ファイバ軸上から 2mm 亀裂が進展した場合、明確に応答信号に相違が現れ、亀裂進展をモニタリングができた。
- ③ 亀裂開口、亀裂閉口に関わらず超音波入力信号の種類を変化させることにより、亀裂進展をモニタリングできることがわかった。

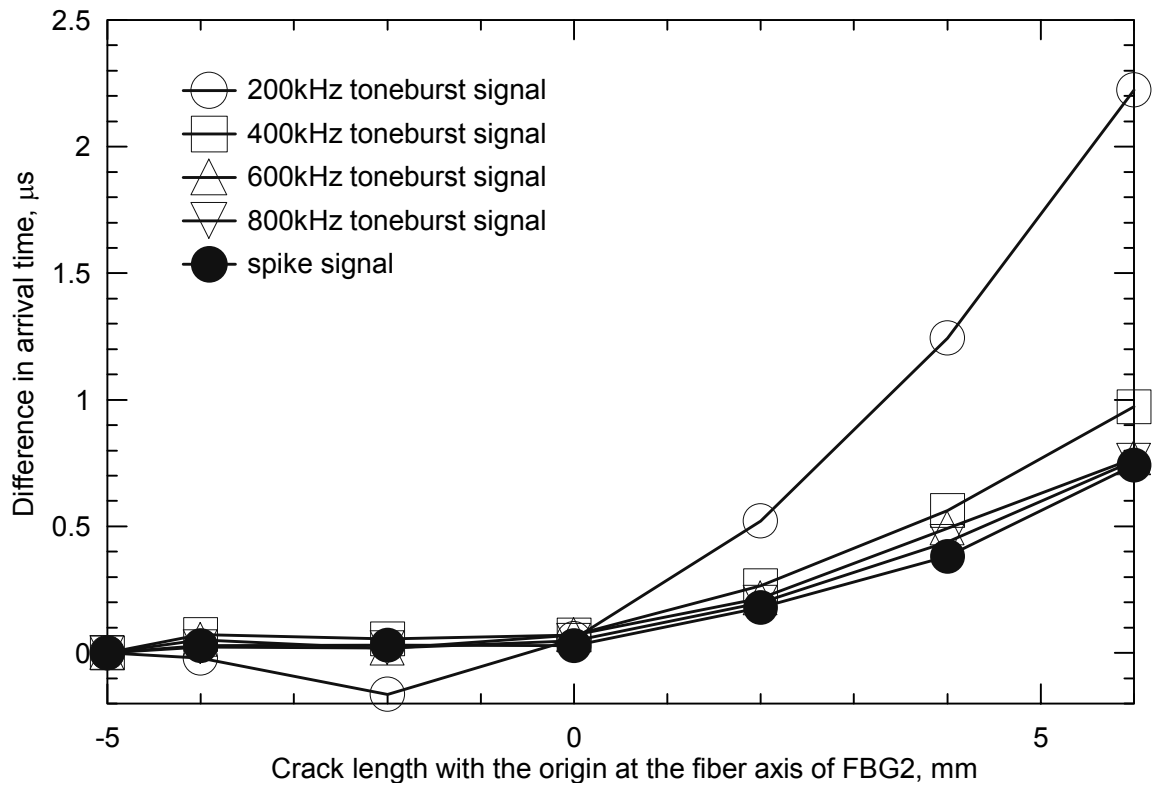


図 3. 4. 3-3 FBG2 が検出した亀裂開口時の超音波応答遅れと亀裂長さとの関係

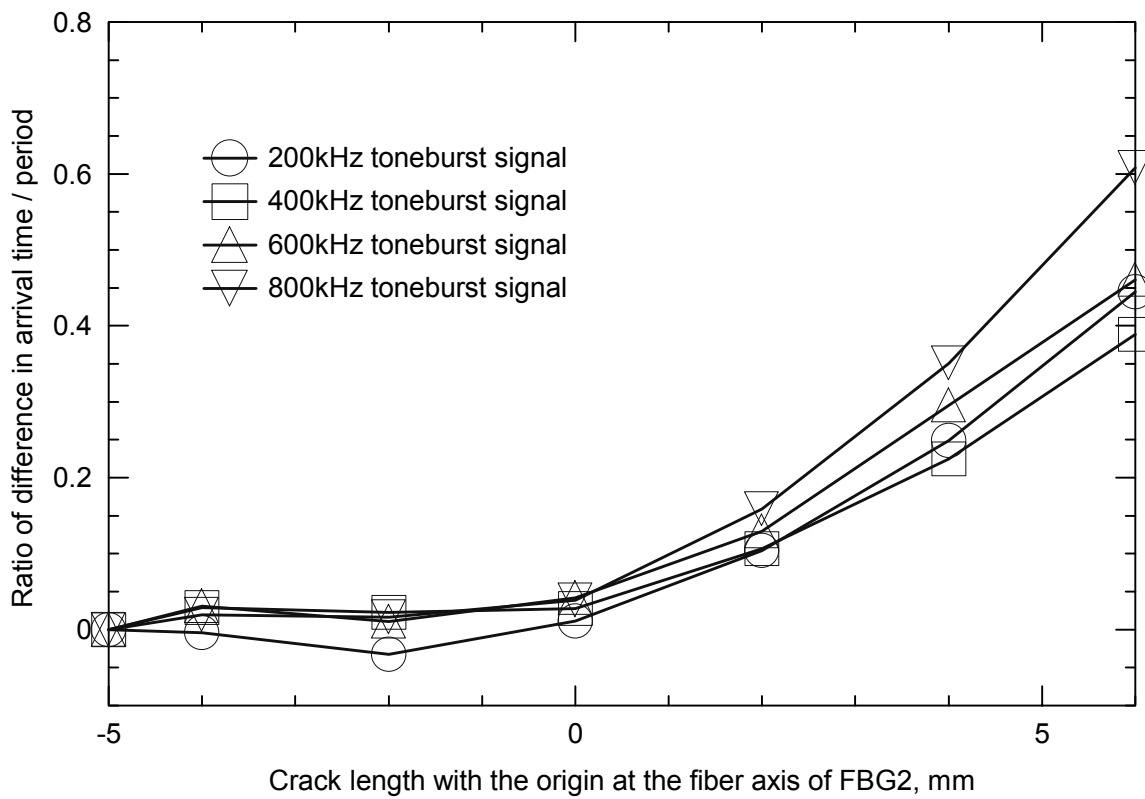


図 3. 4. 3-4 FBG2 が検出した亀裂開口時の超音波応答遅れと入力信号周期の比と亀裂長さとの関係

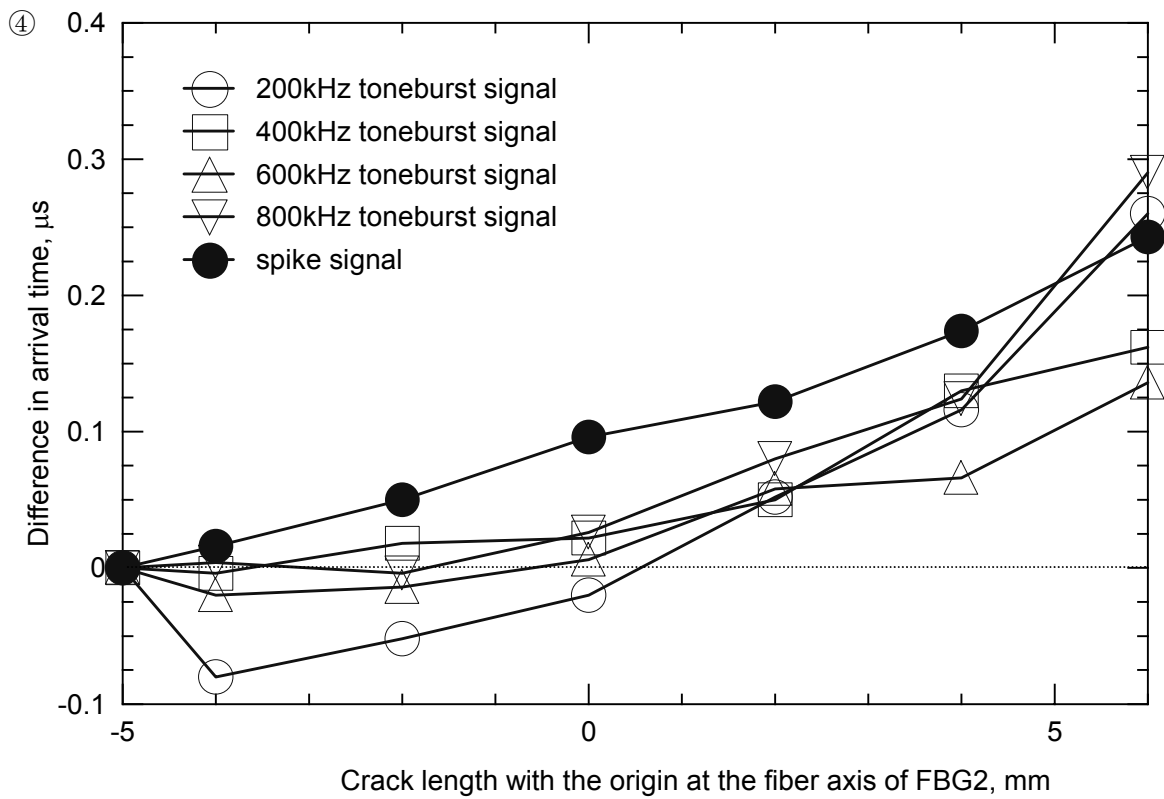


図 3. 4. 3-5 FBG2 が検出した亀裂閉口時の超音波応答遅れとき裂長さとの関係

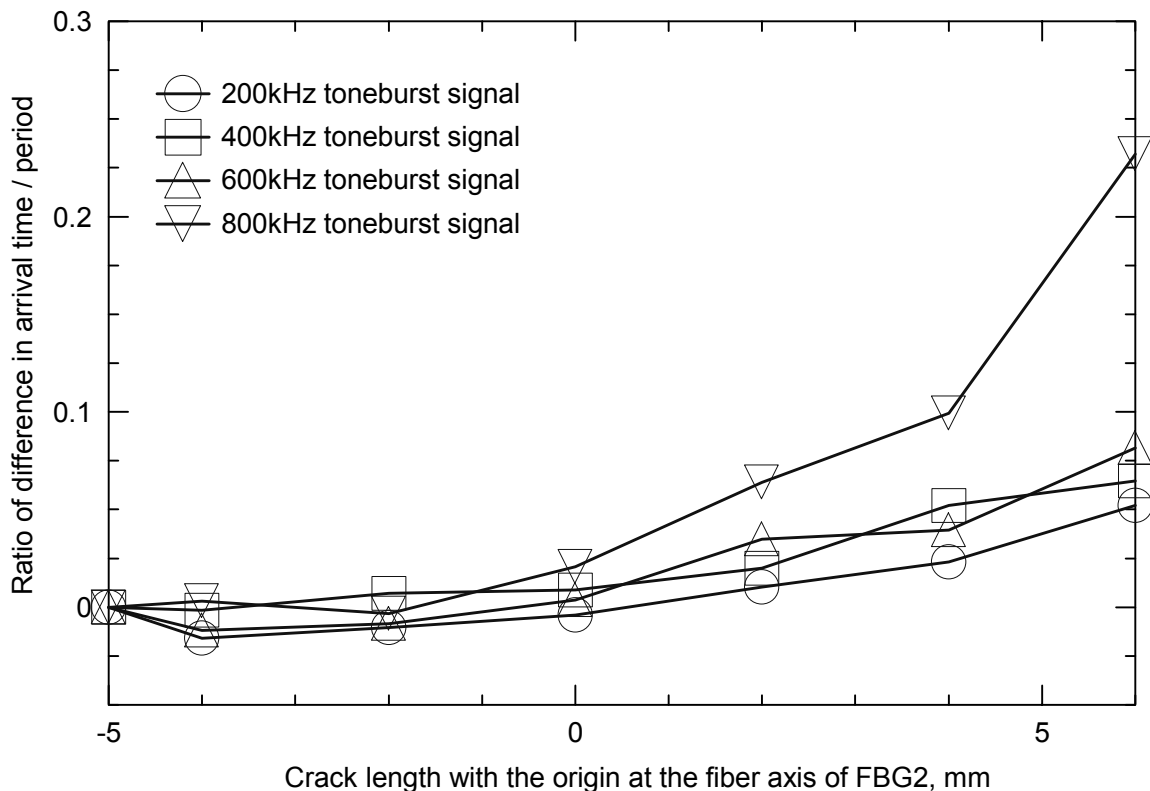


図 3. 4. 3-6 FBG2 が検出した亀裂閉口時の超音波応答遅れと入力信号周期の比とき裂長さとの関係

3.5 FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術の今後の課題

昨年度と今年度、2年間実施した調査研究の結果、FBG センサによりひずみ計測と超音波検出が可能であることを明らかにした。FBG によるひずみ計測は従来技術である金属抵抗ひずみゲージよりもバックグラウンドノイズの少ないひずみ計測が可能であり、波長分離技術の適用により1本の光ファイバに複数のFBG ひずみセンサを設け、多点ひずみ計測が可能であることを実証した。また超音波検出においても従来技術の圧電素子と比較して、FBG は形状が小さいことから超音波検出の位置分解能が高まることや、広帯域な応答特性を有することから優れた損傷検出能を有することを実証した。ここで提案したFBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術はFBG をセンサとしてひずみ計測と超音波検出が可能なることから、これまで実施していたように、ひずみ・超音波計測に個別のセンサを用いた健全性評価センサ網をシンプルにすることができる。

FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術の更なる高度化ならびに実用化においては、下記の技術課題を今後解決していく必要がある。

①低コスト化のためのシステム改良

FBG によるひずみ・超音波計測機能の実現には2種類の光源や光分波器を必要とするなど、経済的観点からは必ずしも従来技術よりも優れているとは言えない。今後、FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術で利用される装置・機器の価格は低下することが予想されるが、低コスト化のためのシステム改良も考慮する必要がある。

②AE 検出のための計測条件の最適化

超音波検出が可能なることから、同じ周波数帯域の弾性波放出(AE)も検出可能であると言える。しかし、AE の場合は超音波検出とは異なり、計測において平均化処理できないことや、突発的に発生する現象であることから、AE 検出のための計測条件の最適化を図ることが難しい。FBG によるAE 検出の計測最適化は、今後、解決する必要がある技術課題である。

③超音波・AE 検出波形と欠陥との関係の解明

AE 検出や超音波を利用した欠陥検出においては、検出波形から破壊モードや欠陥寸法を評価する必要がある。この超音波・AE 応答波形と欠陥との関係は圧電素子を用いた従来技術においても解明すべき技術課題とされており、FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術のみの問題ではない。しかしFBG は圧電素子と比較して優れた位置分解能・広帯域応答特性を有することからこの技術課題にブレーク・スルーをもたらす可能性があり、是非とも検討すべき課題である。

④フィールド試験に関する課題

今後、FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術を実構造物へ適用し、その有効性を実証する必要がある。その際、FBG センサの被検体への装着技術、ならびにひずみ計測に及ぼす温度の影響を除くための温度補償技術を確立する必要がある。

第4章 FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の

同時計測技術の実用化調査

本章では、第3章で示した、現在開発中のFBG センサを利用した鉄鋼構造物のひずみ・亀裂発生・亀裂進展の同時計測技術の実用化に際して、今後、考慮すべき点を明確にするため、本技術を実用化する可能性がある事業者ヒアリングを行った結果を整理する。

4.1 実用化調査の目的

本年度は、FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術が、どのような構造物に対して、どのような目的で、どのように使われるかをより具体的に明らかにするとともに、適用可能な範囲を広げるためには、今後、どのような技術開発が必要となるかを明確にするために、上記の適用分野のうち、石油精製・化学プラントのタンク・配管等の機器類、橋梁の構造部材および球形ガスホルダーを対象とし、これらの施設を有する事業者に対しヒアリングを行った。

4.2 本年度の実施内容

① ヒアリング項目

ヒアリング項目は、実際にひずみもしくは亀裂の計測を行っている構造物の概要、実際にひずみもしくは亀裂の計測を行っている事例もしくはひずみや亀裂の計測を行う場合の基本的考え方に関する質問を行った後、FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術が具体的にどのような場面で使えるか、などの質問を行い、実際に構造物を所有・管理している立場からどのように考えられるかを明らかにすることを試みた。

具体的な質問内容の概要を以下に示す。

- (1) 安全性に気を使っている構造物としてはどのようなものがありますか？
- (2) 実際にひずみや亀裂の測定を行っている、もしくは、行ったことがある事例を教えてください。
- (3) FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術が開発された場合、どのような場面で使えるとお考えですか？

1) ヒアリング対象

ヒアリング対象としては、石油タンクを有している事業者（B社、C社）、石油タンクの防災に関して指導的立場にある機関（A研究所）、化学プラントを有している事業者（D社）、橋梁を有しているとともに管理している機関（E 道路管理者、F社）、球形ガスホルダーを有している事業者（G社）とした。

ただし、B社、C社、D社、F社については、情報活用技術と同時にヒアリングを行ったため、(3)のFBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術に関する質問だけを行った。

4.3 実用化調査結果

ヒアリングの結果得られた、今後改良すべき点を整理して表 4.3-1 に示した。なお、それぞれの今後改良すべき点の模式図を図 4.3-1 に示した。

1) 計測一般に関する改良すべき点

(1) タンクを対象とした技術

タンクの内面に FBG センサを貼り付けて液体に接した場合も計測できる技術 (①) と長期間確実に計測できる技術 (②) およびタンク内面から外へケーブルを配線する技術 (③) が必要となるが、これらの技術は確認試験が必要なものもあるが、基本的に対応可能と考える。

(2) タンク・配管・橋梁他

遠方から計測する技術 (④)、欠陥位置を特定する技術 (⑤) および環境ノイズがあっても計測できる技術 (⑥) が必要となる。遠方から計測する技術は確認試験が必要と考えている。欠陥位置を特定する技術は、今後、開発する予定である。また、環境ノイズに対する技術については、信号処理技術を開発する予定である。

2) 亀裂計測に関する改良すべき点 (タンクを対象)

タンクの外側から内側の亀裂に伴う超音波の変化を検知する技術 (⑦) およびタンクに内容物があっても計測できる技術 (⑧) が必要となる。どちらも基本的には可能であるが、亀裂の検出能については今後確認する。

3) 腐食に関する改良すべき点

(1) タンク・配管を対象とした技術

腐食発生時の AE 検出技術 (⑨)、超音波検出技術 (⑩) が必要となる。AE の検知については基本的に対応可能と考えるが、S/N 比の向上が鍵となる。また、超音波検出技術については、超音波の音速の測定やその波形変化で検知する方法を検討していくことが考えられる。

(2) 配管を対象とした技術

配管の腐食に伴う AE を検知する技術 (⑪)、保温材下の腐食を計測する技術 (⑫) が必要となる。配管の腐食に伴う AE や保温材下の腐食は可変レーザ光の利用、超音波スペクトロスコピーによる信号分別法等の技術を開発する必要がある。

4) 割れ計測に関する改良すべき点

割れに伴う AE 検出技術 (⑬)、超音波検出技術 (⑭) が必要となる。AE の検知については基本的に対応可能と考えられ、確認試験を行えばよいが、割れに伴う超音波検出については、表面波の伝播時間、減衰の変化、超音波スペクトロスコピーによる方法等を検討していく。

5) 多点計測に関する改良すべき点

橋梁などの部材が複雑に接合されている構造物の、輻輳した溶接線などを計測するための多数の計測点に対応する技術が必要となる (⑮)。この場合、基本的には現在のシステムで計測可能ではあるが、コストが高くなることが考えられるため、適用に当たっては、コストの評価が重要となる。

以上、今回実施した実用化調査結果から出てきた改良すべき点を列記したが、これらを踏まえて以下に実用化調査のまとめを記す。

○実用化調査結果のまとめ

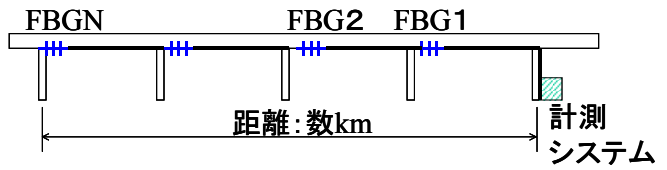
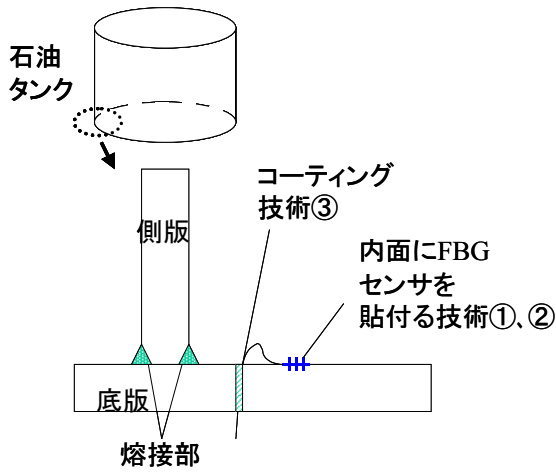
今回のヒアリングで対象としたのは、タンク、化学プラント、橋梁と球形ガスホルダーである。これらのヒアリングによって、損傷監視に対する大きな期待があることがわかった。特に、監視においてひずみと超音波両者の計測が求められているものもあり、FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術が今後有望であることがわかった。一方、現行法規に基づいて保全が行われている構造物にあっては、法規制の改定を伴わない限り、新しいセンシング技術の適用は困難であることがわかった。今後、技術開発を進め、実証試験を行うことで、社会的認知を得て本技術 (FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術) の実用化を目指していく必要がある。

ヒアリング結果を総じて言えば、広い領域の状態監視を行うことが目的としてあげられている。この目的では、AE 計測が有望であり、ノイズとの識別や位置標定結果に基づく実証を図っていく必要がある。この目的に対しては、本システムは遠隔で、必要に応じて自動データ採取が可能であることから、環境とノイズ発生の状況を把握した適切な計測方法の確立と統計処理による評価手法を確立し、より精度よい評価を行う技術を開発していくことが有望である。このために、FBG センサによる計測結果の評価を含めた AE 計測技術の開発が速やかに進められることが期待される。

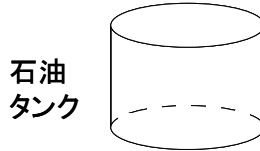
また、同時にデータの信頼性を高めるには、構造物の受けたひずみ履歴を同一システムで把握することが有益であり、また、タンクのアニューラー部の監視で見られた通り、超音波計測との併用が有益であると考えられる。これらの技術が完成し、データベースなどと連携した総合評価システムとして最終的な実用化がより早く図られることが期待される。

表 4.3-1 FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術の今後改良すべき点

項目	番号	対象構造物	対象部位	技術	要素技術	既存技術等による対応可能性	今後の対応
計測一般	①	タンク	タンク：底版と側版との取付部（アニュラー部）	タンク内面にFBGセンサを貼り付ける技術	液体に接した場合でもFBGセンサで計測できる技術。防護技術もしくは耐水技術。	対応可能と考 える	防護技術もしくは耐水技術の確立
	②	タンク	タンク：底版と側版との取付部（アニュラー部）	タンク内面にFBGセンサを貼り付ける技術	長期間、確実にセンサとしての機能を保持しつづけるFBGセンサのメンテナンスフリーの長期耐久技術	確認試験が必要	確認試験の実施
	③	タンク	タンク：底版と側版との取付部（アニュラー部）	タンク内面から外へ光を通すケーブルを配線する技術	ケーブルの光を阻害しないコーティング技術	対応可能と考 える	コーティング技術の開発
	④	タンク・配管・橋梁他	計器設置位置から計測地点までの距離が長くなる場所	遠方から計測できる技術	光ファイバを利用した計測手法の特長は、距離による減衰が非常に少ないということであり、遠方でも計測な技術	対応可能と考 える	遠方計測の確認試験の実施
	⑤	タンク・配管・橋梁他	特定せず	センサの計測範囲が広く、欠陥位置の特定が可能な計測法	欠陥位置の特定について、今後開発予定の技術	対応予定	開発予定
	⑥	配管・タンク	配管全長、タンク全面	運転等による環境ノイズと計測すべき信号の識別が容易な計測法	どこまでの環境ノイズがあっても計測できるか検証する技術	技術開発の要あり	信号処理技術を開発予定
亀裂	⑦	タンク	タンク：底版と側版との取付部（アニュラー部）	タンクの外側からアクセスできない場所の亀裂を検知する技術	タンクの外版（厚さ：50mm程度）を通して、超音波で亀裂を検出できる技術	対応可能と考 える確認する 必要あり	超音波の送受信は可能である 亀裂の検出能について確認する試験の実施
	⑧	タンク	タンク：底版と側版との取付部（アニュラー部）	タンク内部に内容物（危険な石油等）があっても超音波を発振できる技術	電気ノイズを発生させない超音波発振子	対応可能と考 える	確認試験の実施 超音波発振は基本的にタンク外部からとする
腐食	⑨	タンク・配管	配管全長、タンク全面	腐食を対象とした技術	腐食発生時の微小なAEでも検知できる計測技術	対応可能と考 える	確認試験の実施 S/N比の向上が鍵
	⑩	タンク・配管	配管全長、タンク全面	腐食を対象とした技術	腐食に関する超音波検出技術	対応可能と考 える	表面波の音速、波形変化で検知する方法を検討・試験の実施
	⑪	配管	配管全長	配管の腐食に伴うAEを検知する技術	FBGによる計測感度を高めるとともに、ノイズと有用な信号を区分する技術	技術開発の要あり	可変レーザー光による感度の向上、超音波スペクトロスコーピーによる信号分別法等
	⑫	配管	保温材下の配管全長	保温材下の配管にFBGを取り付け、この配管の腐食を計測する技術	保温材をはがしてFBGを設置・配線し、保温材の外に光ファイバを引き出す技術	対応可能と考 える AE・超音波の計測は可能	確認試験の実施
割れ	⑬	タンク・配管	タンク全面、配管全長	割れを対象とした技術	割れ発生時のAEが検知できる計測技術	対応可能と考 える	確認試験の実施
	⑭	タンク・配管	タンク全面、配管全長	割れを対象とした技術	割れが検知できる超音波発振による計測技術	対応可能と考 える	表面波の伝播時間、減衰の変化、超音波スペクトロスコーピーによる方法等を検討
多数計測	⑮	橋梁	単位面積当たり に多数の計測点 が必要となる場合	現在考えているものより多点でも計測できる技術	広い波長に対応した光を発する装置を開発する技術	対応可能と考 える	コストの評価が重要



④計器設置点から計測位置(計測システム)までの距離が長いケース

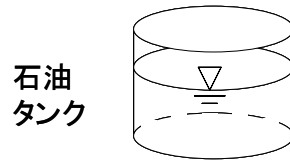
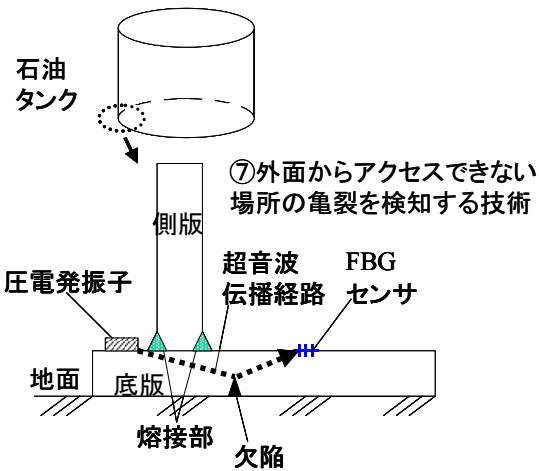


⑤センサの計測可能範囲が広く、欠陥の位置特定が可能な技術

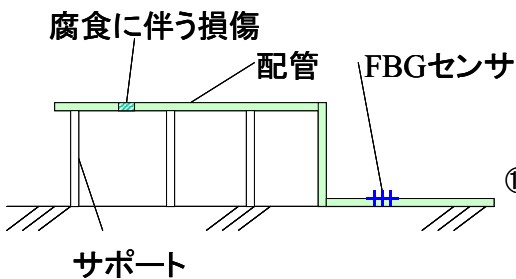
⑥運転等による環境ノイズとの識別技術

⑨、⑩腐食も計測できる技術

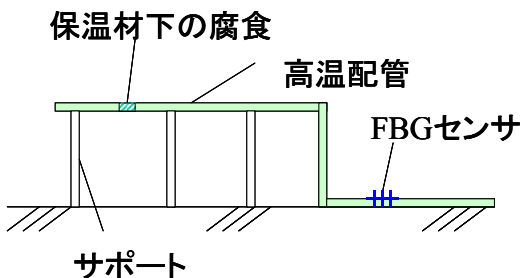
⑬、⑭割れも計測できる技術



⑧タンク内部に内容物があっても計測できる技術



⑪配管を対象とした技術



⑫保温材下の腐食を対象とした技術

⑮橋桁の熔接部など(単位面積当りの計測点が多い場合)

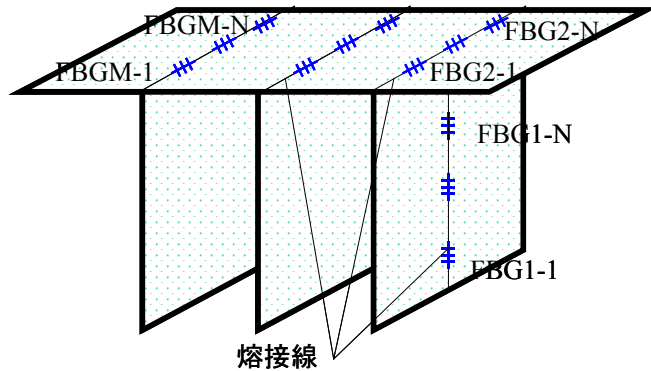


図 4.3-1 今後改良すべき点の模式図

第5章 関連技術の調査

本章では、FBG センサを利用した鉄鋼構造物のひずみ・亀裂発生・亀裂進展の同時計測技術の関連技術として、計測結果の信号処理技術、建物に適用した FBG センサによるひずみ計測および疲労センサを用いた寿命診断技術について概説する。

5.1 計測結果の信号処理技術

光ファイバセンサ等、種々のセンサで取得された信号は通常電気信号であり、雑音除去や物理量への変換プロセスが必要となる。さらに、モデルとの照合によって、通常は専門家によって必要な決断がなされる。しかし、多くのセンサが設置されてネットワーク化されることを前提とすると、極力自動的な診断が望ましい。5.1 では、こうした診断に必要な信号処理について述べる。

5.1.1 信号処理の手順

図 5.1.1-1 に信号処理の基本的な手順を示す。センサによって取得された電気信号は、クレンジング処理によって、ノイズの除去や、線形化処理、さらには物理データへの変換がなされる。高度な診断のためには、さらにモデル構造を推定するためのシステム同定が必要となり、推定されたモデルの特徴量（特徴ベクトル）を抽出することによって、損傷評価がなされる。クレンジング処理については、標準的な手法が広く知られている。

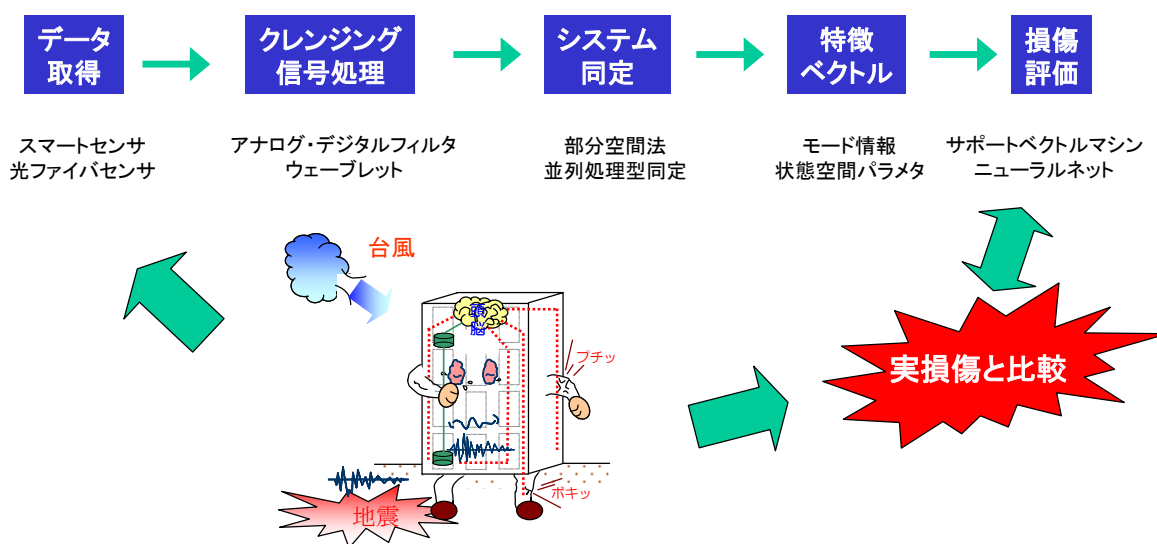


図 5.1.1-1 信号処理の手順

5.1.2 ウェーブレット変換とサポートベクトルマシン

時間・周波数分析に優れるウェーブレット変換は、超音波信号を使った診断など、その非定常性の

強い信号を用いる診断に対して、特に有効な信号処理手法である。また、特徴ベクトルを確定した後のパターン認識には多数の手法があるものの、その診断性能の高さと処理時間の短さに特徴のあるサポートベクトルマシン (SVM) は、最近多くの成果が報告されている。

5.1.3 ウェーブレット変換と SVM を用いた損傷検知

FBG センサ等によって、超音波信号を計測し、上記で述べた信号処理を利用することで、精度の高い損傷診断が可能となる。ここでは、アルミ板のボルト接合部の損傷診断に応用した例を示す。手順を図 5.1.3-1 に示す。

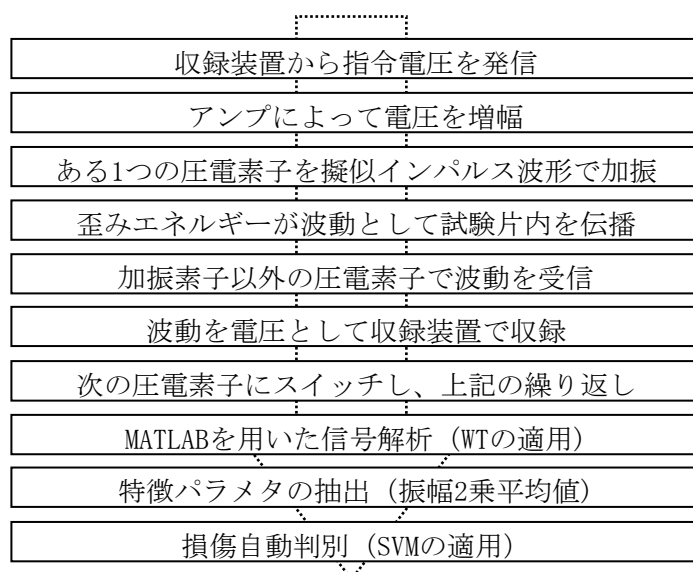


図 5.1.3-1 超音波信号を用いた損傷診断の手順

この手順に従って、アルミニウム薄板(長さ 300mm×幅 200mm×厚さ 3mm) 2枚をアルミニウム短板(長さ 40mm×幅 200mm×厚さ 2mm) 2枚をあて板としてボルト接合部を構成し実験を行った。損傷はボルト接合部におけるボルト(1~10)を欠落させることで仮定した。健全時(1通り)に加え、10本あるボルトを1本ずつ外した時(10通り)、2本ずつ(13通り)、4本ずつ(6通り)、5本ずつ(5通り)、6本ずつ(5通り)、8本ずつ(5通り)の計45通りを測定対象とし、パターン認識における学習データと検証用データの確保のため、各測定を2回ずつ実施した。

本編では、相関係数を用いた損傷判別手法なども紹介しているが、ここでは SVM(45クラス分類)を用いた損傷判別結果を紹介する。検証用データを用いて損傷判別を行う際、出力が正となるデータの組み合わせが分類させたクラスを意味することになる。例えば、学習データとボルト番号3を1本欠落させた検証用データ $k = 4$ を比較すると、値が正になっているのは $i = 4$ の1箇所となり、欠落しているボルトの位置はボルト番号3であると推定することができる。よって、実際は欠落しているボルトの位置は知らないものとする、SVMを用いることで無知のボルト欠落位置を推定することが可能となる。表 5.1.3-1 より WT 適用前で 33/45 の正解率、WT 適用後では 45/45 の正解率で損傷を判別することができ、相関係数と比較して、SVM の高い識別精度を確認することができた。

表 5.1.3-1 SVM(45 クラス)を用いた損傷判別結果($i=0\sim 10$)

i	Extracted bolt No.	Before applying WT		After applying WT	
		Correct	Incorrect	Correct	Incorrect
0	none	1.000		1.000	
1	1		-0.082	0.213	
2	2		-0.199	0.126	
3	3	0.600		0.542	
4	4		-0.301	0.014	
5	5	0.482		0.452	
6	6		-0.413	0.773	
7	7	0.343		0.234	
8	8	0.205		0.433	
9	9	0.047		0.834	
10	10		-0.293	0.215	

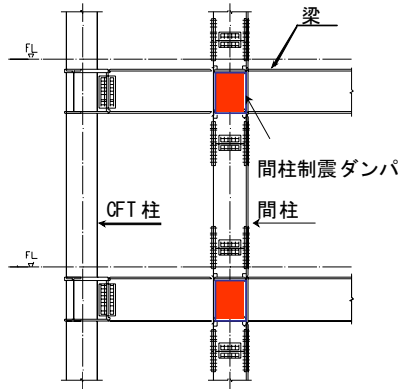
5.1.4 まとめ

ここでは、FBG センサ等のセンサによって取得される信号の処理手順について示した。通常は電気信号として取得されたデータから最初にノイズの除去を行い、物理量へと変換するクレンジング処理が行われ、その後にシステム同定を通じて、損傷との相関のある「特徴ベクトル」が抽出される。このベクトルから損傷を診断することになるが、自動化のためにはパターン認識が不可欠となる。ここでは、有力なパターン認識手法の一つであるサポートベクトルマシンを特に取り上げ、信号取得から診断にいたるプロセスの自動化に有用であることを、アルミ板のボルト接合部の損傷検知を例に示した。こうした新しい信号処理手法の活用によって、損傷診断の精度とスピードが各段にアップすることが期待される。

5.2 建物に適用した FBG センサによるひずみ計測

FBG 方式の光ファイバセンサは、土木あるいは建築構造物の分野でも、ひずみ計、温度計、変位計、加速度計などの計測モジュールが開発され、実建物に適用されている。ここでは中規模鉄骨造建物に FBG 型ひずみ計、温度計、変位計を設置し、構造ヘルスマモニタリングを実施している例を紹介する。

当該建物は、鉄骨造地上12階建ての研究施設（日本女子大学「百年館」、延床面積13,891m²、2001年5月竣工）である。建物外観を図5.2-1(1)に示す。この建物は制震構造を採用しており、通常の柱梁構造以外に間柱を設け、図5.2-1(2)に示すように間柱と梁との交差部に極低降伏点鋼パネル（間柱制震ダンパ）を配している。地震時に建物に入力するエネルギーは主としてこのパネル部分で吸収し、主構造体における地震時のエネルギー吸収を抑制する設計となっている。そこで地震時には間柱制震ダンパへの吸収エネルギー量と柱梁部のひずみ値を計測して建物の構造安全性を評価する目的で、また常時には供用の経時ともなう建物の構造特性の変化を追跡する目的で、FBG型光ファイバセンサを用いた構造ヘルスマモニタリングが実施されている。



(1) 建物外観 (2) 間柱制震ダンパ (3) FBG変位計の設置

図5.2-1 FBG型光ファイバセンサによる鉄骨造建物の構造ヘルスマニタリング

同モニタリングシステムには64点の光ファイバセンサと12成分のサーボ型加速度計が用いられている。光ファイバセンサのうち12点は間柱制震ダンパに設置した変位計、44点は柱またはスラブに設置したひずみ計、8点は温度計である。FBG型光ファイバ変位計の概要を図5.2-2に示した。この変位計は計測対象の変形をコイルばねで吸収してひずみ値に換算する機構であり、ひずみをFBG型光ファイバで計測している。同図には、同変位計の変形と出力（波長変動）との関係も示したが、良好な線形性が確認されている。なおこの変位計の最小分解能（計測精度）は0.0008mm程度である。

FBG型光ファイバセンサは、それぞれのセンサ毎に異なる間隔のブラッグ格子を焼き付けることにより、1本の光ファイバ上であっても多点で計測が可能となる。また、1本の光ファイバ上で複数の物理量を測定する事も可能である。この建物の場合に適用した計測システムでも、計測器の性能上、1本あたり最大64点の多重化計測が可能となるが、センサが計測できる最大振幅をある程度大きく取るため1台あたりの波長幅を広帯域にする必要があり、今回は、光ファイバ1本につき最大6つのブラッグ格子を割り付けている。すなわち、光ファイバ1本当たり6点のデータを計測している。

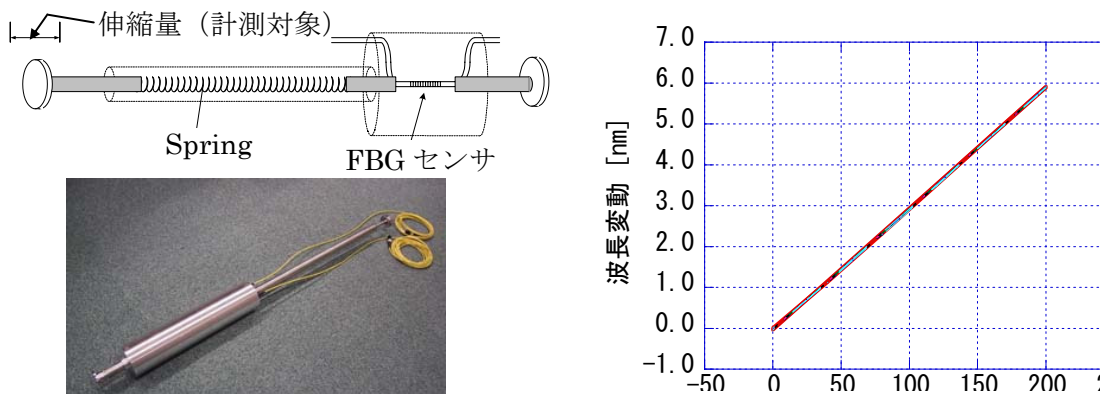


図5.2-2 FBG型光ファイバ変位計と出力例（荷重変形曲線）

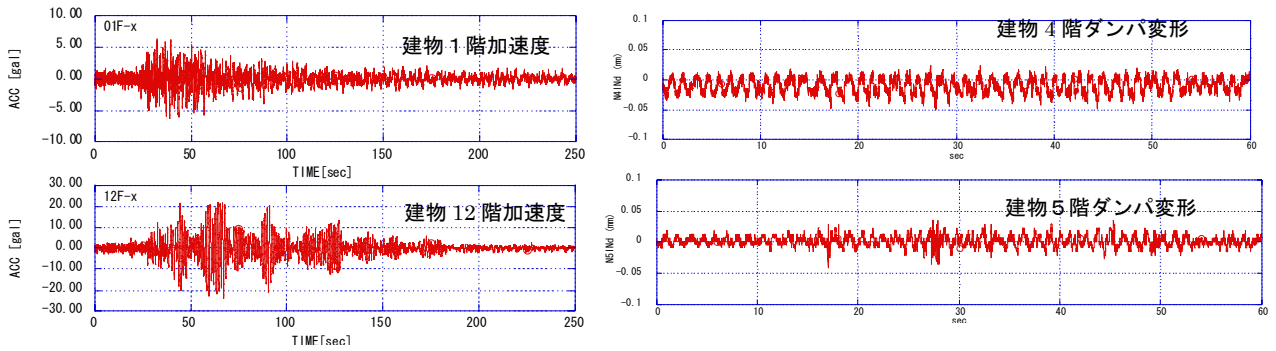


図 5.2-3 FBG 変位計で観測した地震時応答波形例 (2003. 5. 26)

観測地震記録のうち、2003年5月26日に発生した宮城県北部の地震 (M7.0、震央距離 390km) 時の記録の一部を図 5.2-3 に示す。図の左側2つが建物1階、最上階(12階)の加速度記録で、右側2つの図が建物4階、5階の間柱制震ダンパの変形を横軸を拡幅して示している。図から地震時の建物頂部加速度は 20 ガル程度であり、間柱制震ダンパが機能するほどの大きな揺れではないが、光ファイバセンサによって制震ダンパの弾性変形が明瞭に記録されていることがわかる。

また、研究段階ではあるが、より多点での計測を目指してアレイ検出器と時分割多重を組み合わせた FBG センシングシステムや、複合材料製航空機の高速度ヘルスマonitoringのために FBG とピエゾ変換器を組み合わせ、弾性波動伝播と AE を計測するシステムなど新たな開発が積極的に進められている。

5.3 疲労センサを用いた寿命診断技術

5.3.1 はじめに (疲労診断ニーズと疲労センサの概要)

橋梁、車両、軌道、船舶、建設機械などに代表される鉄鋼構造物は定期的なメンテナンスを施すことにより設計寿命を超えて使用するという需要が高まる傾向にある。メンテナンスでは、製品を比較的短い間隔で点検し、その検査結果および亀裂診断結果に基づき必要に応じて延命化のための修理や補強を行う。検査には、目視観察の他、打音法、磁粉探傷法、浸透探傷法、超音波探傷法や最新の計測機器が用いられるが、これまでの探傷法では、欠損、亀裂、腐食、変形等、既に構造物に発生している不具合を発見することを目的とするもので潜在的な欠陥を発見することは困難であり、将来発生すると思われる疲労亀裂などに対しては、ほとんど効力がない。

もしこのような疲労亀裂の発生が事前に予測できるのであれば、小規模な補修亀裂補強で十分となり、繰り返し費用のかさむ定期点検の間隔を長くできるという利点が生じる。さらに、疲労亀裂の早期発見は重大な事故を未然に防ぐことができる。このような保守管理の需要に応じ、応力頻度調査に基づく構造物の寿命評価手法というものが従来から適用されてきた。この手法により構造物の診断をするには、多数のひずみゲージを疲労強度に問題のあると予測される部位に貼り付け、それぞれのひずみゲージの動的アウトプットを記録し、データ処理することにより応力頻度解析をする必要がある。

図 5.3.1-1 に示す「疲労センサ」は、製品の寿命予測の現実的な評価手段として将来発生すると思われる疲労亀裂を探知することを目的とし、鋼構造物の中でも最も疲労強度について敏感である溶接接合部の疲労損傷度評価のために開発された。疲労センサは一種の犠牲試験片であり、以下に示す特

徴を有する。

- ①小型で溶接ビードのような応力集中部への適用が可能、②ひずみゲージのように接着剤により容易に貼付が可能、③計測機器、配線が不要、④繰り返し圧縮応力にも反応、⑤長期間の適用により信頼性の高い寿命予測が可能

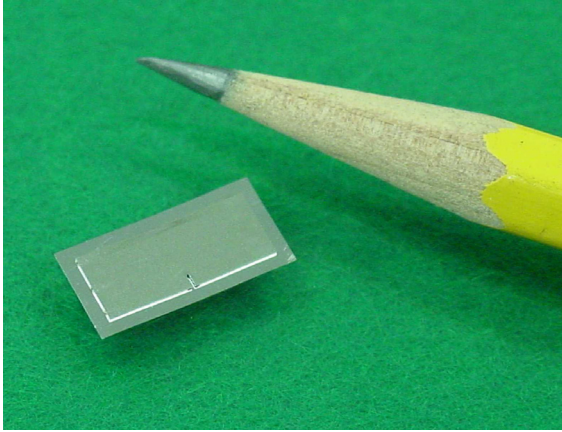


図 5.3.1-1 疲労センサ

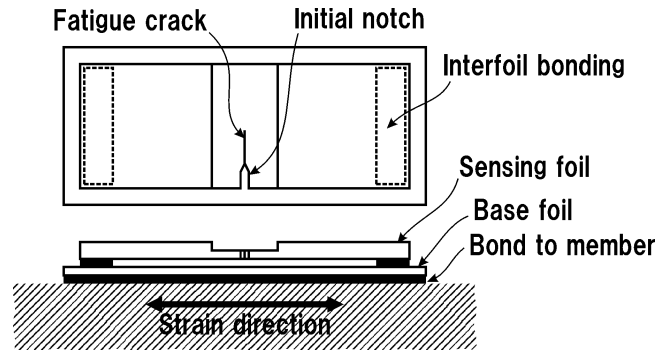


図 5.3.2-1 疲労センサの構造

5.3.2 疲労センサの概要

疲労センサは繰り返し応力を受ける構造部材の溶接線近傍の表面に貼付し、センサ上では繰り返しひずみを増幅させセンサの亀裂進展速度を加速する仕組みとなっている。

図 5.3.2-1 に疲労センサの構造を示す。2枚の金属箔からなっており、上部の箔はニッケル製の亀裂進展箔、下部はインバー鋼製のベース箔と呼ぶ。亀裂進展箔の中央部は減肉による溝が形成され、その溝の中央部の片端には初期スリットが形成されている。2枚の金属箔は室温より高い温度環境下で微小抵抗溶接などにより両端で接合されることにより、検査部材面に貼付した時点であらかじめ亀裂進展箔に張力を付与している。

センサは通常のひずみゲージと同様に接着剤で部材表面に貼付することができ、ある程度の大きさの繰り返し応力に対し亀裂進展箔のスリット先端から疲労亀裂が発生し進展する。亀裂進展速度は繰り返し応力範囲の大きさと繰り返し数に依存する。初期張力を付与してあるため、部材の圧縮応力に対しても疲労亀裂は発生し進展する。

センサのサイズは十数ミリ程度、厚さは数百マイクロン程度の小型であるため、溶接線近傍の応力集中を感知するのに都合が良い。

5.3.3 寿命評価法

疲労損傷度評価では、ホットスポット応力 (HSS) の概念が採用されている。図 5.3.3-1 に示すように、HSSは、疲労亀裂が発生するとされる溶接止端での、局所的な応力集中を除いた、構造的亀裂幾何学的応力集中として定義できる。HSSについては、いくつか論文が発表されているが、0.3t法は一般的で実用的と考えられる。0.3t法とは、溶接止端から板厚の0.3倍の距離を離れた点での応力をHSSとする一点計測法である。この点にセンサを貼付すれば、溶接継手の形式に寄らない共

通のS-N曲線により合理的で効果的な疲労損傷度評価が可能になる。

溶接構造物の寿命評価には、疲労強度等級に基づく溶接継手の疲労強度の知識を必要とする。図 5.3.3-2 に疲労寿命評価フローを示す。

疲労寿命評価について、疲労センサを用いた手法と従来法とを図 5.3.3-3 で比較する。どちらの方法でも、計測期間中に溶接継手に蓄えられた短期間の疲労損傷度を外挿することにより累積損傷度と疲労寿命を推定する。余寿命はこれまでの稼働状況とこれからの稼働計画を考慮して算定することになる。従来法では、ひずみゲージを用いて動的な応力変化を記録する。鋼製橋梁の診断では数十のひずみゲージと多チャンネルデータ記録装置、それに配線が必要になる。通常、信頼できるデータの取得には、48時間から72時間程度の動的データを取得することになる。その後、データ処理により応力頻度分布を求め、累積損傷則に基づき計測期間中の疲労損傷度を計算する。

疲労センサでは、上記と同量のセンサを貼付する必要があるが、計測機器による制限がないので適用枚数に上限はない。貼付後の数ヵ月後、例えば1、3、6ヵ月後にセンサの亀裂進展量を計測する。概要版には記載していないが、本編に記載した D_s と Δa 、 D と D_s の関係から、計測期間中の疲労損傷度を得る。

両者の最も大きな違いは計測期間である。従来法では計測期間が数日間であり、年間を通して特異な現象を捉えてしまうかもしれないのに対し、疲労センサによる方法では数ヶ月という計測期間とすることにより、実際の稼働状況を反映した平均化したデータが得られる。

5.3.4 適用例

現存する疲労損傷評価技術は、疲労センサを用いることで余寿命診断ができるようになった。これまでの使用状態とこれからの使用状態が一定であれば、疲労センサは経年構造にも新規構造にも使うことができる。稼働期間においてもし検査する構造の形状が変更されたり補強されたりした場合は、数値解析により得た応力レベルの変化により修正することにより、疲労診断は可能である。荷重の負荷条件が変化した場合も、計算により累積疲労損傷度を求めることができる。

診断結果により、ユーザは製品の補修の必要性、維持管理における検査の間隔などについて判断ができる。疲労センサは開発の2000年より2004年12月までに、下記に示す対象物に対し約1,000枚の適用実績がある。

- ・橋梁 高速道路橋、鉄道橋
- ・車両 高速車両、通勤車両
- ・鉄道 転轍機、ガイドレール
- ・船舶 バラ積み運搬船、水中翼船
- ・開発中の製品 など

高速道路橋では、ひずみゲージによる頻度解析法との比較により疲労センサの寿命評価精度を検証した。

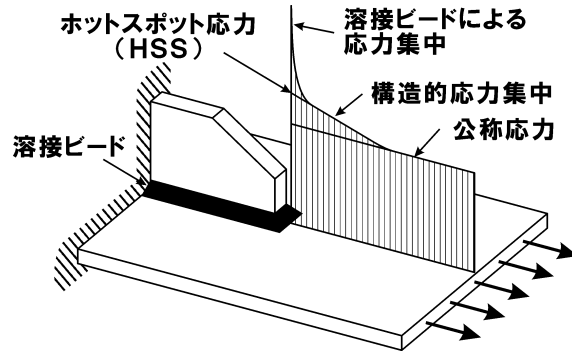


図 5.3.3-1 構造的応力集中とホットスポット応力

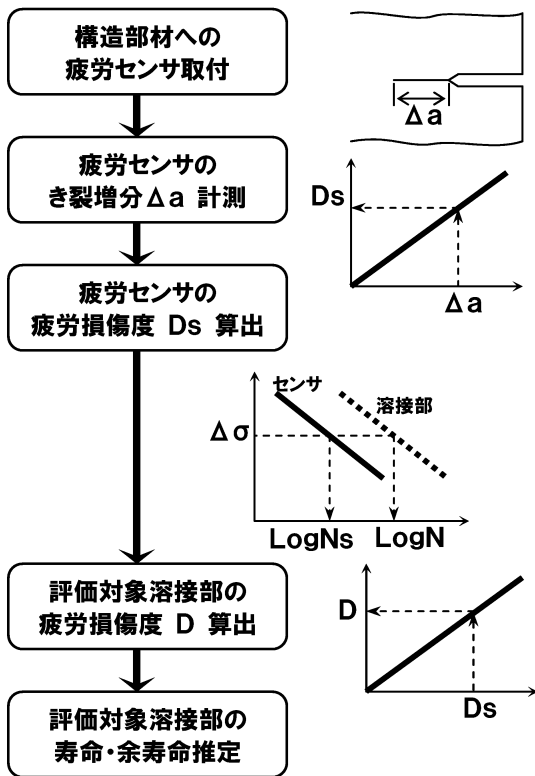


図 5.3.3-2 疲労センサを用いた疲労寿命評価
のフロー

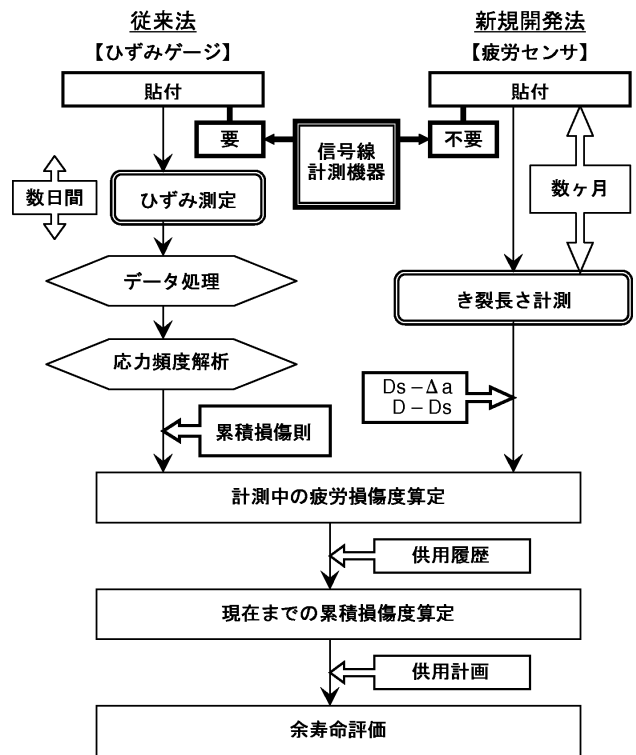


図 5.3.3-3 ひずみゲージと疲労センサを用いた
疲労寿命評価法の比較

第6章 調査研究の成果

本書は、(財) エンジニアリング振興協会が (財) 機械システム振興協会から受託した「FBG センサを利用した鉄鋼構造物のひずみ・亀裂発生・亀裂進展の同時計測技術に関する調査研究」の報告書である。

以下、本報告書の成果を概説する。

第1章では、本報告書の位置付けを説明するとともに、本報告書の各章に記述した内容の概要をごく簡単に示した。

第2章では、鋼構造物の高度メンテナンスにおけるセンシング技術と題して、エンジニアリング振興協会が進めている高度メンテナンスシステム開発の中における本技術の位置付けと、既存のひずみ測定技術、亀裂測定技術、光ファイバによる測定技術に対する本技術の意義付けを行った。

第3章では、本年度の実施内容のうち、①「ひずみ」と「亀裂」を同時に検出する技術の高度化に関する調査研究、②亀裂進展監視技術の検討を行った結果を示している。

これらの検討を進める前に、3.1 で昨年度までの実施成果と今年度の実施概要を説明し、3.2 で超音波検出感度向上のためのシステム構築のための実験を実施した。この実験は、広帯域光源とレーザ光源を使用した場合の超音波の検出実験を行うとともに、亀裂検出実験を行い、光源の違いによる超音波および亀裂の検出感度の相違を調べた。その結果、レーザ光源の優位性が明らかとなった。

3.3 では、①「ひずみ」と「亀裂」を同時に検出する技術の高度化を行うため、ひずみと超音波による亀裂の同時計測システムを構築し、ひずみ計測と亀裂計測を行った。その結果、実験によって評価されたブラッグ波長からのひずみの算出法を確立するとともに、超音波検出実験により亀裂の存在により、超音波応答に差が生じ亀裂が検出できることがわかった。

3.4 では、②亀裂進展監視技術の検討を行うため、異なる反射特性(ブラッグ波長)を持つ FBG センサを3台取り付け付けた試験片において、亀裂を進行させた時の超音波の反射波形を調べた。入射波としてはスパイク波と4種類の周波数特性を有するトーン・バースト波を使用した。亀裂を進展させるための疲労試験は、繰り返し周波数 10Hz で実施した。ビデオマイクロスコープを使用して疲労亀裂の長さを測定し、その時の超音波応答を調査した。なお、超音波検出実験は亀裂開口時とともに、亀裂閉口時にも行った。実験の結果、以下の点が明確になった。

- (1) 疲労亀裂の進展に伴い FBG の応答に遅れが生じた。
- (2) 入力するトーン・バースト波の周波数が 800 kHz と、高振動数となれば、亀裂開口時ばかりでなく、亀裂閉口時にも亀裂の進展に伴う FBG の応答の遅れが明確に検出できた。
- (3) 亀裂の位置と FBG センサの位置関係により、この時間遅れが明確に現れる条件が明確となった。
- (4) 亀裂の進展状況と FBG の応答の遅れとの関係がわかったので、この遅れ時間から亀裂の進展状況の評価できる可能性があることが明確となった。

この章の最後、3.5 でこれらの実験結果から得られた今後の技術的課題として以下の4点があげられた。

- (1) 低コスト化のためのシステム改良
- (2) AE 検出のための計測条件の最適化
- (3) 超音波・AE 検出波形と欠陥との関係の解明
- (4) フィールド試験に際しての課題

第4章では、本年度の実施内容のうち、③ 実用化に対する検討の結果を示している。

実用化に対する検討では、(1)石油タンクの防災に関して指導的立場にある機関、(2)石油タンクを有している事業者、(3)化学プラントを有している事業者、(4)橋梁を有している事業者、(5)ガスホルダー（球形タンク）を有している事業者の合計7機関に対して、本システムを適用する場合にどのような点の改善が必要となるかを明確にするために行ったヒアリングの結果を整理した。

その結果、多くの事業者が本システムに興味を示していただいた。現在考えている開発を継続することにより、FBG センサを利用した鉄鋼構造物のひずみ・亀裂発生・亀裂進展の同時計測技術を使用する可能性のある機関も見られた。

なお、ヒアリングの結果15点の今後改良すべき点が明確となった。これらの技術のうちほとんどは確認試験を実施するだけで対応可能であると考えられる。また、ヒアリングの結果、特に腐食・割れの計測に対するニーズが大きいことがわかった。

今後、これらの点を考慮しつつ開発を継続していきたい。

第5章では、関連技術の調査として、(1)計測結果の信号処理技術、(2)疲労センサを用いた余寿命診断技術および(3)建物に適用した FBG センサによるひずみ計測について調査した結果を報告している。

(1) 計測結果の信号処理技術

これは、FBG などの計測結果を処理する際に、パターン認識を利用することによって信号処理システムを自動化する技術である。この技術によって、損傷診断の精度とスピードが飛躍的にアップすることが期待される。

(2) 建物に適用した FBG センサによるひずみ計測

鉄骨造地上12階の制振構造の建物に FBG 変位センサを取り付け、構造ヘルスマモニタリングを実施している。この建物の比較的小さな地震時の応答が観測され、FBG センサで動的な変形が測定できることがわかった。

(3) 疲労センサを用いた余寿命診断技術

応力集中部にも容易に取り付けが可能な簡便な疲労センサを開発した。このセンサを使うことにより、疲労損傷に対する余寿命が比較的簡単に評価でき、今後、多方面で使用されることが期待されている。

以上、「FBG センサを利用した鉄鋼構造物のひずみ・亀裂発生・亀裂進展の同時計測技術に関する調査研究」の成果の概要を説明した。今後の課題および展開については、4. で述べる。

4. 調査研究の今後の課題および展開

(1) 技術開発成果から見た今後の課題

FBG によるひずみ計測は従来技術である金属抵抗ひずみゲージよりもバックグラウンドノイズが少ないひずみ計測が可能である。昨年度と今年度の2年間に渡り(財)機械システム振興協会から調査研究を受託し、波長分離技術の適用により1本の光ファイバに複数のFBG センサを設け、多点ひずみ計測および超音波による亀裂計測が可能なことや、レーザ光源などを使用することにより、亀裂検出における位置分解能が高まり優れた損傷検出能を有することを実証した。さらに、提案したFBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術は、FBG をセンサとして、ひずみ計測と超音波検出が可能なことから、これまでひずみ・超音波計測に個別のセンサを用いてきた健全性評価センサ網をシンプルにすることができる。

しかしFBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術の更なる高度化、ならびに実用化においては、下記の技術課題を今後解決していく必要がある。

(a) 低コスト化のためのシステム改良

FBG によるひずみ・超音波計測機能の実現には2種類の光源や光分波器を必要とするなど、経済的観点からは必ずしも従来技術よりも優れているとは言えない。今後、FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術で利用される装置・機器の価格は低下することが予想されるが、低コスト化のためのシステム改良も考慮する必要がある。

(b) AE 検出のための計測条件の最適化

超音波検出可能なことから、同じ周波数帯域の弾性波放出(AE)も検出可能であると言える。しかしAEの場合は超音波検出と異なり、計測において平均化处理できないことや、突発的に発生する現象であることから、AE 検出のための計測条件の最適化を図ることが難しい。FBG によるAE 検出の計測最適化は今後、解決する必要がある技術課題である。

(c) 超音波・AE 検出波形と欠陥との関係の解明

AE 検出や超音波を利用した欠陥検出においては、検出波形から破壊モードや欠陥寸法を評価する必要がある。超音波・AE 応答波形と欠陥との関係は圧電素子を用いた従来技術においても解明すべき技術課題とされており、FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術のみの問題ではないが、FBG は圧電素子と比較して優れた位置分解能・広帯域応答特性を有することからこの技術課題にブレーク・スルーをもたらす可能性があり、是非とも検討すべき課題である。

(d) フィールド試験に際する課題

今後、FBG センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術を実構造物へ適用し、その有効性を実証する必要がある。その際、FBG センサの被検体への装着技術、ならびにひずみ計測に及ぼす温度の影響を除くための温度補償技術を確立する必要がある。

(e) 実験結果の評価ソフトの開発

実験で得られる超音波の検出波形などから、亀裂の位置などの評価方法およびこれらのデータから評価される破壊モードや欠陥寸法など、物理的な評価値の算出方法などを確立するとともに、評価ソフトを作成・実用化する必要がある。

(2) 実用化調査結果から見た今後の課題

石油タンク・化学プラント・橋梁・ガスホルダーを有する事業者には **FBG** センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術の使用可能性を中心にヒアリングを行った。各事業者とも本技術に興味を示していただき、本システムを適用できる場面が数多く出てくるものと期待される。

また、このヒアリングでは 15 点の今後改良すべき点をご指摘いただいた、これらの指摘から以下の 4 点が今後の課題としてあげられる。

- (a) 本システムはひずみと亀裂を主な対象と考えて開発してきたが、腐食・割れの計測のニーズが石油タンクや化学プラントで大きいことがわかった。今後、このようなケースでも適用できるような開発も進めていきたい。
- (b) 調査を行った先々で、コストが問題としてとりあげられることが多かった。今後、本システムの利点、すなわち、新しい機能とのバランスを考慮しつつ、コスト低減策を考える必要がある。
- (c) より確実に亀裂を計測するためには、環境ノイズなどとの分離技術が重要となると考えられる。ノイズ低減の方策はいくつか考えられるが、今後、確認試験が必要と考えている。
- (d) 鋼製橋梁などは、石油タンクなどに比べて構造が複雑であり、溶接線が多く、単位面積当り多数の計測点が必要となる場合が多い。現状のシステムでは、計測点が増えると、多数の光源システムが必要となることから、コストが高くなる。今後、計測点が増えてもコストがあまり増加しないようなシステムも考えていく必要がある。

(3) 実証実験の実施

現在、本システム開発のための実験は、実験室内の小さな試験片を用いて実験している。今後、実構造物へ適用する前ステップとして、実物レベルの大きさの試験体に、現在考えている **FBG** センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測システムを設置し、実物レベルでひずみと亀裂が確実に計測できることを確認する実験を行う必要がある。実験の成果は、本技術の実証の他、実用化システムの構築に生かされる。

(4) 実用化開発

実際の構造物に設置できる比較的簡便で、タフなシステムを構築する。実用化に際して問題となる大きなポイントは、コストの問題と長期的に安定して計測の問題である。コストに関しては、安いにこしたことはないが、亀裂や腐食などが確実に測定できることになれば、若干のコストアップも許容できるであろう。長期的な安定性の問題は、**FBG** センサの確実な貼付技術の他、防水等の長期安定化対策および光源なども含めた計測システムの小型化なども必要になると考えられる。

以上、**FBG** センサを利用したひずみと亀裂発生・進展の同時計測技術の今後の課題を整理してきた。今後、これらの課題を解決することにより、様々な鋼構造物の長期安定性モニタリングが可能となり、より高度なメンテナンスシステムの構築に資するよう、開発を進めていく予定である。

最後に、本技術開発にあたりヒアリングにご協力いただいた機関の皆様および委員会・実用化 WG などに参加いただき貴重なご意見を賜った皆様に謝意を表します。

—禁無断転載—

システム技術開発調査研究 16-R-2

FBGセンサを利用した鉄鋼構造物のひずみ・
亀裂発生・亀裂進展の同時計測技術
に関する調査研究
報告書
—要旨編—

平成17年3月

作 成 財団法人 機械システム振興協会
東京都港区三田一丁目4番28号
TEL 03-3454-1311

委託先名 財団法人 エンジニアリング振興協会
東京都港区西新橋一丁目4番6号
TEL 03-3502-4444