

光ファイバ広帯域振動検出システムの開発

— FBGセンサを用いたひずみ・AE同時計測技術 —

津田 浩*、佐藤 英一、中島 富男、佐藤 明良

打音検査や超音波検査のように振動を利用すると構造物の健全性を評価することができる。光ファイバセンサは電気センサの適用が困難であった極限環境下における構造物健全性評価を可能にすることが期待されている。近年、多機能、多重化可能、電磁波非干渉といった特長を有するファイバ・ブラッグ・グレーティング (FBG) による振動検出の研究が盛んに行われている。しかしこれまでのFBGセンサシステムは温度・ひずみ変動下で超音波を検出することが困難であった。我々はこの技術的障害を乗り越えるシステムを新たに開発した。この論文ではコンパクトで経済性に優れた数Hz~2 MHzの広帯域な振動検出が可能なFBGセンサシステムの開発過程を構成的アプローチに基づいて紹介する。

キーワード: 超音波、振動、アコースティック・エミッション、非破壊検査、光ファイバセンサ

Development of fiber optic broadband vibration-detection system

– Simultaneous measurement of both strain and acoustic emission using a fiber Bragg grating sensor –

Hiroshi TSUDA*, Eiichi SATO, Tomio NAKAJIMA and Akiyoshi SATO

Structural integrity can be examined using methods that evaluate response to vibration, such as hammering tests and ultrasonic inspections. Fiber optic sensors are expected to allow structural health monitoring in harsh environments where conventional electric sensors cannot be used. Recently, detection of vibration with a fiber Bragg grating (FBG) has been intensively investigated, because FBGs have many advantages such as multifunction abilities, multiplexing, and electromagnetic immunity. In using previously proposed systems incorporating FBGs, however, there was a technical difficulty in detecting ultrasound under varying temperatures and strain conditions. We developed a novel system that overcomes this technical barrier. Our system is also capable of detecting vibrations across a broad frequency band from several Hz to around 2 MHz. This paper presents how our compact and economical vibration-detection system with an FBG sensor was developed.

Keywords: Ultrasound, vibration, acoustic emission, non-destructive testing, fiber-optic sensor

1 はじめに

打音検査と超音波検査は構造物に振動を与え、その応答特性から構造物の欠陥の有無を評価する。一方、材料が微視破壊する時には、アコースティック・エミッション(AE)と呼ばれる表面エネルギーの解放に伴う弾性波放出があり、超音波域の振動が発生する。また、回転機械では、回転周波数と比較して回転軸のゆがみは低周波域に、ベアリング部の破損は高周波域に高い成分強度を有する異常振動を誘発することが知られている^[1]。このように構造物・機械の健全性評価において、振動測定はとても重要な役割を果たす。

これまでの振動測定では、電気センサであるひずみゲージや圧電センサが多用されてきた。周波数が数 kHz までの振動測定には、電線の電気抵抗のひずみ依存性を利用

するひずみゲージが用いられる。AE等の超音波振動になると、測定されるひずみが小さくなることから、ひずみゲージでは振動を検出できなくなり、圧電センサが用いられる。ただし圧電センサには共振周波数が存在するため、測定対象の周波数域に応じた共振周波数を有する圧電センサを選択する必要がある。つまり機械的振動から超音波振動までの広帯域にわたる振動を測定できる電気センサは皆無である。したがって広帯域の振動を測定可能なセンサおよびその計測システムの開発は、振動を利用した非破壊検査の利便性を大いに高めると期待される。

近年、電気センサの適用が困難な構造物が増えている。例えば、設計の自由度が高く高比剛性・比強度という特長から炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を航空機構造部材や風力発電用ブレードに適用するケースが増えてい

産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2
Research Institute of Instrumentation Frontier, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan * E-mail: hiroshi-tsuda@aist.go.jp

Original manuscript received June 18, 2012, Revisions received August 30, 2012, Accepted September 10, 2012

る。CFRPは導電性材料であることから、電気センサを用いた場合はショート等電磁障害により正確に測定できない問題がある。また放射性廃棄物を処分するための深部地下貯蔵施設等で数十年単位の長期間にわたり施設の安全性を確保する必要がある場合、耐食性・耐久性の問題から電気センサによる健全性評価は難しい。

光ファイバセンサは、上記したような電気センサの問題を解決する構造体健全性評価用センサとして期待されている。中でも波長変調型光ファイバセンサであるファイバ・ブラッグ・グレーティング (FBG) は、ひずみセンサとしてすでに実用化され、近年は超音波センサとしての研究開発が盛んに行われている^[2]。このようなことからFBGは、ひずみゲージと圧電センサの両方の機能を備えたひずみと超音波・AEが同時計測可能なセンサとして最も期待されている。しかし、後述するようにFBGによるAE計測には大きな技術的障壁があり、AEセンサとして実用化されていないのが現状である。FBGと既存の振動検出センサであるひずみゲージおよび圧電センサの特徴を比較したものを表1に示す。

この論文では、宇宙構造物の健全性評価のための光ファイバセンサシステムの構築を目標とした宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の研究開発プログラムに携わる中で開発された、コンパクトなAE計測システムの開発経緯と、JAXA、民間企業、産業技術総合研究所 (AIST) が共同で構築したFBGセンサを用いたひずみ・AE同時計測システムを紹介する。

2 開発される光ファイバセンサシステムがもたらすインパクト

近年、航空機は、非破壊検査では検出できない微小な初期欠陥から運用中にき裂が進展することを前提に寿命を評価する損傷許容設計に基づいて製造されている。この設計思想に基づく構造体では、定期的な非破壊検査を行い、次の検査までに急速なき裂進展が見込まれる大きさの欠陥を修理することで構造体の信頼性を確保している。もし構造体中の欠陥の存在や進展を運用中にモニタリングすることができれば、格段にその信頼性を向上させることができる^[3]。このためスマート構造体と呼ばれる、欠陥の発生や進展のモニタリングに寄与するひずみ計測やAE計測機能を包含した構造体が、航空・宇宙分野を中心に注目されている。スマート構造体の実現には、耐久性に優れたシンプルなセンサ網から構成されるシステムの開発が望まれている。

これまでの電気センサでは、上述のようにひずみとAE計測用のセンサを個別にそろえる必要がありセンサごとに配

表1 振動測定に用いられるひずみゲージ、圧電センサ、FBGセンサの特徴

	ひずみゲージ	圧電センサ	FBGセンサ
応答周波数範囲	数kHzまで	数十kHz～数十MHz	数Hz～2MHz
ひずみ計測	○	×	○
超音波・AE計測	×	○(注1)	○(注2)
ひずみと超音波・AEの同時計測	×	×	○
耐食・耐久性	×	×	○(注3)
電磁障害	×	×	○
価格(円/個)	300～600	3,000～300,000	10,000～30,000

(注1) 測定対象の周波数域に応じた共振周波数を有する圧電センサを選択する必要がある。

(注2) 既存技術によるFBGのAE計測には大きな技術的障壁がある。

(注3) グレーティングが消失する400℃以上の高温、または放射線環境での利用には時間的制限がある。

線を必要とすることから、大型構造物の健全性評価には複雑で重量の大きなセンサ網になる懸念がある。一方、光ファイバセンサは、耐久性に優れ、軽量なことからスマート構造体用センサに適している。特に波長変調型センサであるFBGは、波長多重技術を利用して一本の光ファイバ上に複数のセンサポイントを設けることが可能なことから、極めてシンプルなセンサ網を構築できると考えられる。このような理由から、ひずみとAEの二つの計測機能を有するFBGセンサシステムは、スマート構造体の中核技術として期待されている^[4]。

3 FBGについて

3.1 FBGのセンサ機能

FBGは光ファイバの導光路であるコアの屈折率がファイバ軸方向に周期変化した構造をもつ。FBGは0.2～2nm程度の狭帯域光を選択的に反射する性質があり、この反射光の中心波長はブラッグ波長と呼ばれる^[5]。FBGが受けるひずみまたは温度変化に応じて、ブラッグ波長は比例変化する。ブラッグ波長1.55μmを有するFBGのブラッグ波長のひずみおよび温度感受性は、それぞれ1.2pm/μεおよび14pm/Kである。屈折率変調を与えている空孔欠陥が消失・拡散するような400℃以上の高温または放射線環境での利用には時間的制約があるが、それ以外の環境ではFBGは耐久性に優れた温度・ひずみセンサとして機能する。なお第1章に、FBGは優れた耐食性・耐久性から放射性廃棄物を処分するための深部地下貯蔵施設のモニタリングセンサとして期待されていると記したが、強力な放射線の照射はFBGを消失させる可能性があることを考慮しなければならない。

ブラッグ波長の計測に波長計等の光計測器を用いた場合、サンプリング速度はせいぜい数Hzであることから、

振動検出といった動的な計測はできない。動的なブラッグ波長計測法として光フィルタ、またはレーザを復調に利用する波長-光強度変換法がある^{[6][7]}。光フィルタ復調方式は、FBGの反射光を透過率が波長に依存する光フィルタに入射させ、FBGのブラッグ波長変化を光フィルタの透過光強度変化として検出する。一方、レーザ復調方式は、図1に示すようにFBGの反射スペクトルの勾配が急峻な波長域にレーザを入射させることで、わずかなブラッグ波長変化を大きな反射率変化つまりFBGからの反射光強度変化として検出する。

3.2 FBGによるAE計測の技術的課題

材料に熱的または力学的負荷が加わると、ひずみが発生し突発的な微視破壊が生じる。このときに発生するAEを計測するためには、温度やひずみ変動条件下で超音波振動を高感度に検出できるセンサシステムが必要である。AEがもたらすひずみ変化はせいぜい数 $\mu\epsilon$ 程度で、これに伴うFBGのブラッグ波長変化はせいぜい数pmである^[8]。このような微小で高速なブラッグ波長変化はレーザ復調方式を利用して高感度に検出できる。しかし、ひずみ約0.008%で温度約7Kの変化をFBGが受けると反射スペクトルは0.1nm波長シフトし、図1に示すようにレーザ波長はFBGの反射スペクトルから外れる、つまり動作域から外れる問題がある。また光フィルタ復調方式では、周期的な光学特性を有する光フィルタを利用することで動作域を広げることが可能だが、レーザ復調方式と比較すると検出感度が劣る。このようにFBGによる超音波・AE計測技術は未成熟な段階にあり、FBGのブラッグ波長が大きく変動するひずみ・温度変動条件下においても、超音波検出可能なAE計測システムの開発が望まれていた。

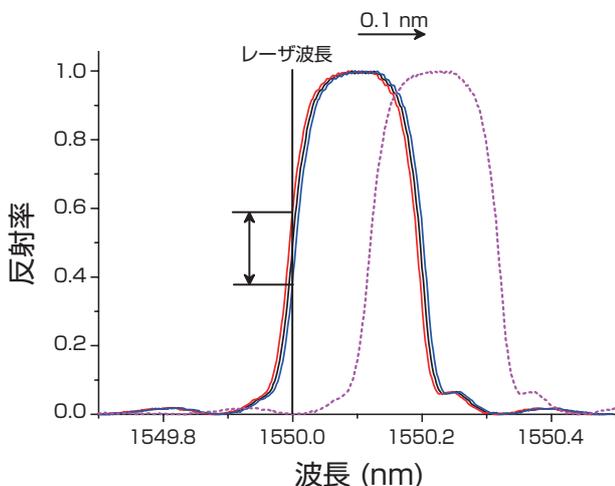


図1 レーザ復調方式の超音波検出原理
ひずみ約0.008%または温度約7Kの変化で、反射スペクトルは0.1nm波長シフト。

4 FBGを用いたAE計測システムの開発

我々は2008年秋から2011年春まで、JAXAの研究プロジェクトである宇宙オープンラボの課題名「大型構造物の構造ヘルスマニタリング技術の研究開発」に参画し、ロケット等の宇宙構造物に適用されるひずみとAEの同時多点計測可能なFBGセンサシステムの開発に係わった。このプロジェクトではAISTが計測技術の開発と提供、民間企業が計測システムの設計・製作および実験遂行、そしてJAXAが実証試験のための実験場の提供および研究統括を行う研究体制を取った。

プロジェクトが開始された2008年当時は、AE計測可能なシステムとしてAWG (Arrayed Waveguide Grating) またはFabry-Perot干渉フィルタといった、周期的な光学的特性を持つ光デバイスを復調用光フィルタに利用するシステムが提案されていた^{[9][10]}。しかしFBGを用いたAE計測は報告されておらず、FBGのAE計測能は未知であった。このような状況であったので、プロジェクト初年度はFBGのAE計測能の評価、および光フィルタ復調方式によるAE計測可能性の検討の2点に課題を絞り研究を行った。

4.1 レーザ復調方式によるAE計測

FBGによる超音波検出ではレーザ復調方式が最も感度が高いことから、レーザ復調方式により超音波の一種であるAEを検出し、これまでのAE計測に用いられてきた圧電センサとAE計測能を比較した。具体的にはロケット燃料タンクに用いられるCFRP圧力容器の耐圧試験中のAEをFBGと圧電センサで検出し、両センサのAE計測挙動を比較した。

これまでレーザ復調方式による超音波計測では、FBGは図2(a)に示すように被検体に貼り付けられたり、埋め込まれたりしていた。このようなFBGの反射スペクトルは、被検体が受けるひずみに応じて波長シフトする。このためひずみ変動条件下で連続的に発生するAEを計測するためには、反射スペクトルシフトをモニタリングしてレーザ波長を超音波検出可能な波長にフィードバック制御することが考

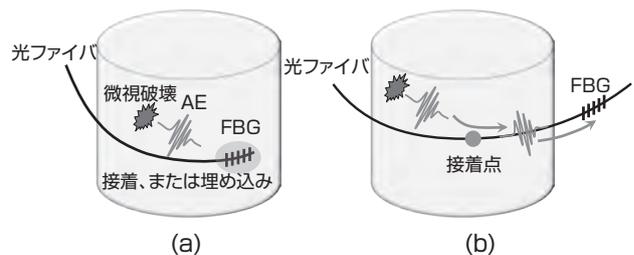


図2 FBGの被検体への取り付け方法
(a) 従来の取り付け法、(b) FBG反射スペクトルがひずみの影響を受けない取り付け法。

えられる。しかし、材料破壊時の不連続なひずみ変化にレーザー波長制御が追従できないことから連続的な AE 計測は困難である。

そこで図 2 (b) のように FBG を書き込んだ光ファイバの FBG 部以外の箇所を被検体に取り付ける工夫をした。この場合、被検体で発生した AE は被検体と光ファイバの接着点を介して光ファイバに入り、FBG に到達する。FBG は被検体に接していないことから、反射スペクトルは AE のみの影響を受けて波長シフトする。屋内であれば温度変化は小さいことから、実験室内で行われる破壊試験ではこの FBG センサの取り付け法により連続 AE 計測が可能になった。

CFRP 圧力容器の耐圧試験中に FBG センサと圧電センサから検出された累積 AE 事象数と圧力-時間関係を図 3 に示す。この耐圧試験では圧力 1MPa を越えてから両センサともに AE を検出し始めた。両センサが検出した AE は圧力の増加に伴い増加する、また圧力が一定に保たれた時間では AE 増加率が減少する類似した挙動を示している。このように FBG は圧電センサと同程度の AE 計測能を有することがわかった^[11]。

4.2 光フィルタ復調方式による AE 計測

ロケット等の宇宙構造物に搭載するシステムには寸法、重量、消費電力に大きな制約がある。JAXA が提示したロケット搭載用 AE 計測システムの仕様制限は、サイズ $200 \times 300 \times 150 \text{ mm}^3$ 、重量 4 kg、消費電力 14 W 以下であった。前節に記したレーザー復調システムは、波長可変レーザーや光スペクトルアナライザといった重量や寸法ともに大きな計測器を必要とし、上記した仕様制限を満たすことはできない。光フィルタ復調方式を用いたシステムは、レーザー復調方式と比較して超音波検出感度は劣るが、システムを小型化できるメリットがある。そこで光フィルタ復調方式による AE 計測を試みた。周期的な光フィルタを復調器

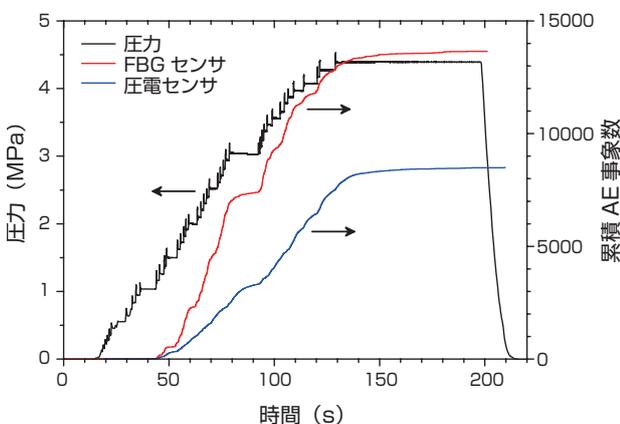


図 3 CFRP 圧力容器の耐圧試験における圧力、累積 AE 事象数-時間関係

に用いた場合、FBG の反射スペクトル幅と同程度の FSR (Free Spectral Range: 光学的特性の周期間隔) を有する光フィルタを用いることで超音波検出感度が最大になることがわかっている^[10]。AWG の FSR の選択肢は少なかったが、Fabry-Perot 干渉フィルタにはさまざまな FSR を有するフィルタが市販されていた。そこでプロジェクトでは、FBG センサの反射スペクトル幅と同程度の FSR を有する Fabry-Perot 干渉フィルタを用いてロケット搭載用システムを試作し、その AE 計測能を評価することにした。

前記したロケット搭載用の仕様制限を満足したシステムを作成することができ、同システムを CFRP の AE 計測に適用した。しかし、検出感度が低いことから、AE 信号とバックグラウンドノイズの識別が困難であった。光源に広帯域光を用いる光フィルタ復調方式では、FBG から反射される光強度はレーザー復調方式と比較して 1/10,000 程度と微弱である。このような微弱光を利用する光フィルタ復調方式では AE 検出感度の大幅な改善は難しいと考え、プロジェクト初年度が終了した時点では AE 計測システムの開発にめどが立っていなかった。

4.3 新しい計測原理に基づく AE 計測システムの開発

産総研では当時、FBG のグレーティング長が超音波検出感度に及ぼす影響を評価する実験を行っていた。この実験で用いたレーザー復調システムの実験セットアップを図 4 に示す。FBG はわずかな温度・ひずみ変化で反射スペクトルが波長シフトすることから、超音波検出に最適なレーザー波長が常に変化する。このため図 4 の光スイッチをポート 1 に設定して FBG の反射スペクトルを光スペクトルアナライザで測定した後に光スイッチをポート 2 に切り替え、レーザー波長を FBG の反射スペクトル勾配が大きな波長、通常は反射率 50 % の波長に制御した後超音波応答を検出していた。

レーザー復調方式は超音波検出感度が高いことから単発超音波に対しても良好な感度で応答を得られるはずだが、応答信号を平均化処理しなければ超音波を検出できなかった。つまり繰り返し超音波を発生させ、その応答信号を加算平均することで超音波を検出できるケース

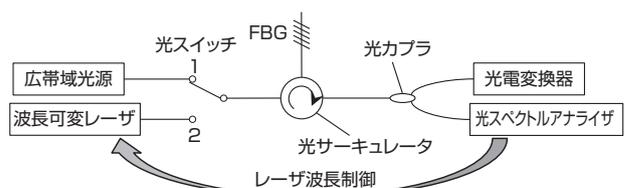


図 4 レーザー復調システムの実験セットアップ

があった。この検出感度低下の原因を探索したところ光スイッチをポート1にした状態、つまり広帯域光をFBGに入射した状態で超音波計測を行っていたことがわかった。操作ミスであったが、この結果から広帯域光をFBGに入射し、FBGからの反射光強度を平均化処理することで超音波応答を得ることができる。換言すれば広帯域光をFBGに入射したとき、光フィルタによる復調なしでも低感度であるが超音波振動を検出できることがわかった。FBGは超音波振動を受けたとき反射スペクトルが pm レベルで変動している。この波長変動が光強度変化として現れていることから、上述したシステムでは広帯域光源出力の波長依存性を利用して超音波を検出したと考えられる^[12]。光源の光出力の波長依存性を利用する考えはこれまで提案されてきたFBGを用いた超音波計測法にはない概念であった。この新しい復調法では復調用光フィルタが不要なことからシステムの大幅な軽量化・小型化が見込まれ、大きなブレークスルーにつながると期待した。

そこで光源の光出力の波長依存性を利用する超音波検出法の高感度化について考察した。上記した実験で用いた広帯域光源のスペクトル分布を図5(a)に示す。用いたFBGのブラッグ波長1,550 nm付近では波長に伴い出力が若干低下する傾向を示している。このブラッグ波長近傍での光スペクトル分布を模式的に表したのが図5(b)で、超音波振動により光出力が0.5～1の間で変化すると仮定する。FBGの反射光強度が10の場合、超音波振動に伴う出力変化は5～10になり強度5の変化が得られる。もしFBGの反射光強度を100に増加した場合、同じ振動に伴う出力強度変化は50になる。したがってFBGからの反射光強度を高めることで超音波検出感度は改善される。FBGからの反射光強度を高めるには、強力な光出力を持つ広帯域光源またはファイバ・リング・レーザの利用が考えられる。広帯域光を用いた場合、光源から出力されるごく一部の光を利用して超音波を検出することから極めて効率

の悪い計測システムである。そこでファイバ・リング・レーザを用いてシステムを組むことにした^[13]。

ここでファイバ・リング・レーザについて説明する。ファイバ・リング・レーザは図6のような構成をもつ。光アンプには微弱な広帯域光を放出する、また比較的高い成分強度を有する波長の光を増幅するという二つの機能がある。光アンプから放出された微弱な広帯域光は、FBGでブラッグ波長を中心とする微弱な狭帯域光として反射され、リング状ファイバを經由して光アンプに入射される。光アンプはブラッグ波長を中心とする狭帯域光を増幅し、増幅された光はFBGで再び反射されてリング状ファイバを循環する。このリング共振器と呼ばれるリング状ファイバにおいて、FBGからの反射光は繰り返し増幅されることで、FBGのブラッグ波長におけるレーザが作られる。例えばシステムのリング共振器長を10 mの光ファイバで構成した場合、FBGからの反射光がリング共振器の周回に要する時間は約33 ns、周波数に換算して30 MHzである。このためFBGがひずみ、温度変化を受けてブラッグ波長が変動しても、十分な応答速度でひずみ・温度に応じたブラッグ波長でレーザ発振する。リング共振器に光カプラを挿入し、レーザの一部を取り出し、光電変換器に入力してレーザ強度を測定する。光アンプが有する光利得に波長依存性がある場合、FBGのブラッグ波長変化をレーザ強度変化として検出することができる。

ファイバ・リング・レーザを用いてFBGのブラッグ波長でレーザ発振させ、波長計等の光計測器を用いてブラッグ波長を測定してFBGが受けるひずみを計測する技術はこれまでもあった。しかし、ファイバ・リング・レーザに組み込まれる光アンプの光利得の波長依存性を利用して、ブラッグ波長変化をレーザ強度変化に変換することでFBGが受ける振動を検出する技術は、この研究の独創的な発案である。

このシステムを利用した超音波検出の一例を紹介する。

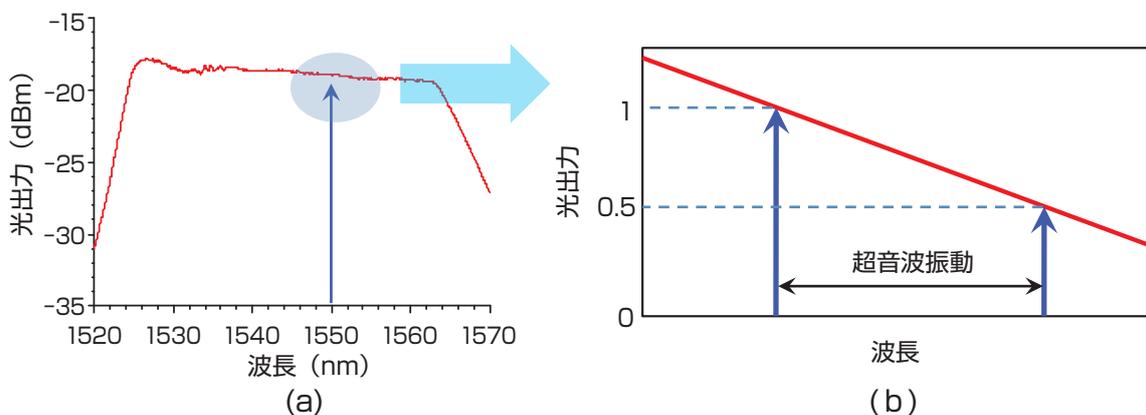


図5 (a) 用いた広帯域光源の出力光スペクトル分布、(b) 波長1,550 nm付近のスペクトル分布模式図

FBG を CFRP 平板に貼り付けて $\pm 0.06\%$ のひずみを与えたとき、図 7 に示すように反射スペクトルが波長シフトする。従来技術であるレーザ復調方式では、超音波検出時に反射スペクトルの波長シフトに応じてレーザ波長を制御する必要があるが、ファイバ・リング・レーザシステムではひずみに応じたブラッグ波長において自発的にレーザ発振する。このようなひずみの異なる状態においても何ら制御することなく図 8 に示すように 3 周期トーン・バースト波で励起した単発超音波を検出することができた^[4]。

また、数 Hz 程度の機械的振動を FBG に与えた際、ひずみゲージから計測された振動周期と一致するレーザ強度変化が現れた。詳細に調べた結果、このファイバ・リング・レーザシステムにより数 Hz ~ 2 MHz に渡る広帯域の振動測定が可能であることがわかった。ファイバ・リング・レーザシステムはシンプルな構成であることから小型化が容易で、前述したロケット搭載用 AE 計測システムの仕様制限を満たし、かつ十分な AE 計測能を有するシステムを図 9 に示すように作成することができた。

5 ひずみ・AE同時多点計測システムへの展開

我々が携わった研究プロジェクトの最終目標は、4つの FBG センサを用いて AE と最大 1% までのひずみを同時計測可能なシステムの開発であった。FBG を用いたひずみ

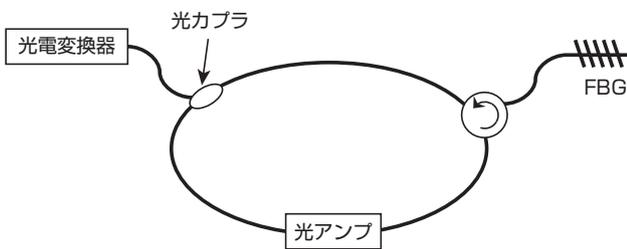


図 6 ファイバ・リング・レーザ

計測については、光フィルタを復調器に利用した波長-光強度変換法が確立されている^[6]。そこでプロジェクト最終年度に、前節に記したファイバ・リング・レーザシステムから得られる FBG 反射光を AE 計測用とひずみ計測用に分岐して取り出し、AE とひずみを同時多点計測できるシステムを作成した。

このシステム開発にあたって以下の技術的制約があった。

1. 一つの光アンプから構成されるファイバ・リング・レーザで複数波長のレーザを安定して発振させることは、現在の技術では困難である。

2. ひずみ計測では混信を避けるため、ひずみを受けた FBG のブラッグ波長が重ならないように各 FBG センサに利用する波長帯域を割り当てる必要がある。具体的には 1% のひずみを受けたとき FBG は 12 nm のブラッグ波長シフトが生じるので、それぞれの FBG に 12 nm 以上の重複しない波長帯域を割り当てる波長多重技術を利用する必要がある。

光通信分野では一本の光ファイバに波長の異なる信号を重畳させる波長多重技術が普及しており、経済的かつ

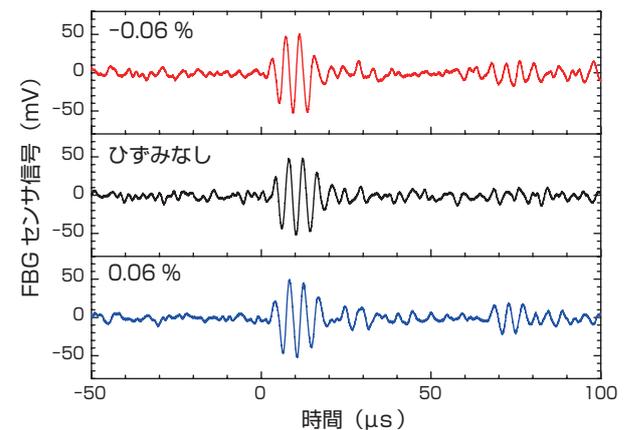


図 8 ファイバ・リング・レーザシステムを用いた超音波検出の一例

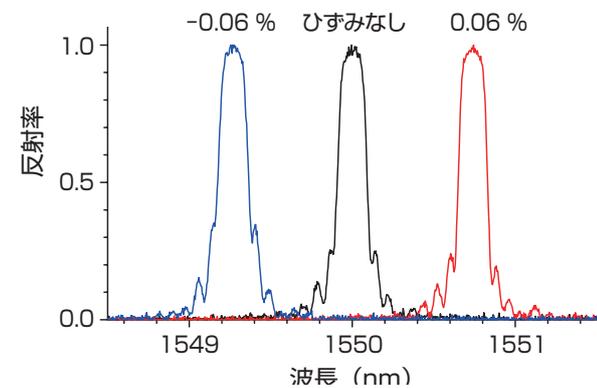


図 7 ファイバ・リング・レーザシステムを用いて超音波計測を行った時の FBG 反射スペクトル

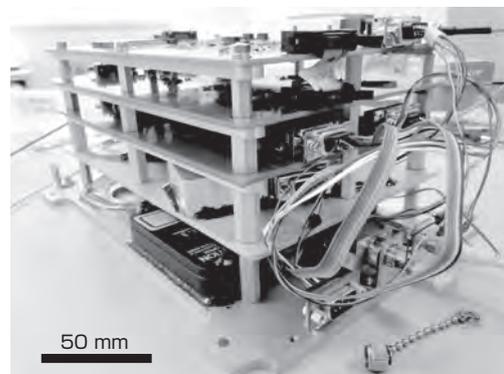


図 9 ファイバ・リング・レーザを利用したロケット構造物へ搭載可能な AE 検出システム

容易に光通信用波長多重コンポーネントを入手することができる。この研究では 20 nm ごとに各チャンネルの波長を分離する仕様の CWDM (Coarse Wavelength-Division Multiplexing) 技術を適用して、図 10 に示すシステムを組み立てた。

このシステムの動作原理は以下のとおりである。ブラッグ波長が 20 nm 分離された 4 つの FBG からの反射光は、光サーキュレータと光カプラを経由して、CWDM フィルタにより波長ごとに 4 つの光ファイバに分離される。各波長の反射光は、個々に光アンプで増幅された後に光カプラで一本の光ファイバに合流される。その後、FBG で反射されてリング共振器を循環することで繰り返し増幅を受け、

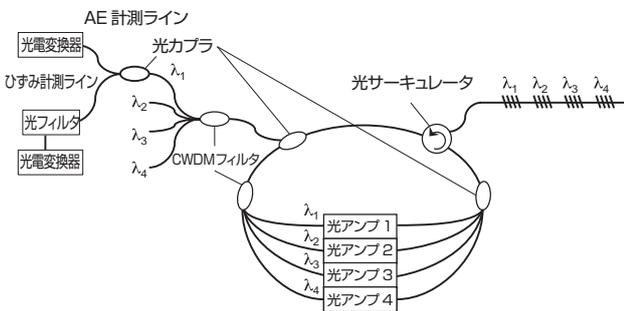


図 10 ひずみ・AE 同時多点検出システムのブロック図
単純化のため図中は波長 λ_1 の出力にのみ AE およびひずみ計測ラインを示したが、実際のシステムでは他波長出力にも同様の計測ラインを設けている。

各ブラッグ波長におけるレーザを得る。このファイバ・リング・レーザで発振された多波長レーザの一部は、光カプラで取り出され CWDM フィルタにより波長分離される。各 FBG からの反射光に対応する波長分離されたレーザは、さらに光カプラによりひずみ計測ラインと AE 計測ラインに分岐される。ひずみ計測用ラインはひずみ復調用の光フィルタに入射され、光フィルタの透過光および反射光強度から FBG が受けるひずみを評価することができる。また AE 計測ラインは光电変換器に接続され、バックグラウンドノイズを取り除くために設定したしきい値レベルを越えた信号が AE として検出される。AE 信号の収録は、圧電センサ用に市販されている AE 収録装置を流用することも可能である。なお、図 10 には一つの波長のみ AE 計測ラインとひずみ計測ラインを示したが、他波長についても同様の計測ラインを設けて 4ch のひずみ・AE 同時計測システムを作製した^[15]。

これまでにこのシステムを用いて液体水素雰囲気中で回転する液体ロケットエンジンの振動計測や固体ロケットモータケースの AE 計測試験を行った。液体水素雰囲気での振動計測は、これまでの電気センサでは計測部にセンサを貼り付けることが困難であったため、振動ガイドである金属棒を介して測定部位から離れて振動を検出していた。FBG は液体水素雰囲気においても被検体に接着させて計測することが可能で、これまでの電気式センサでは検出できな

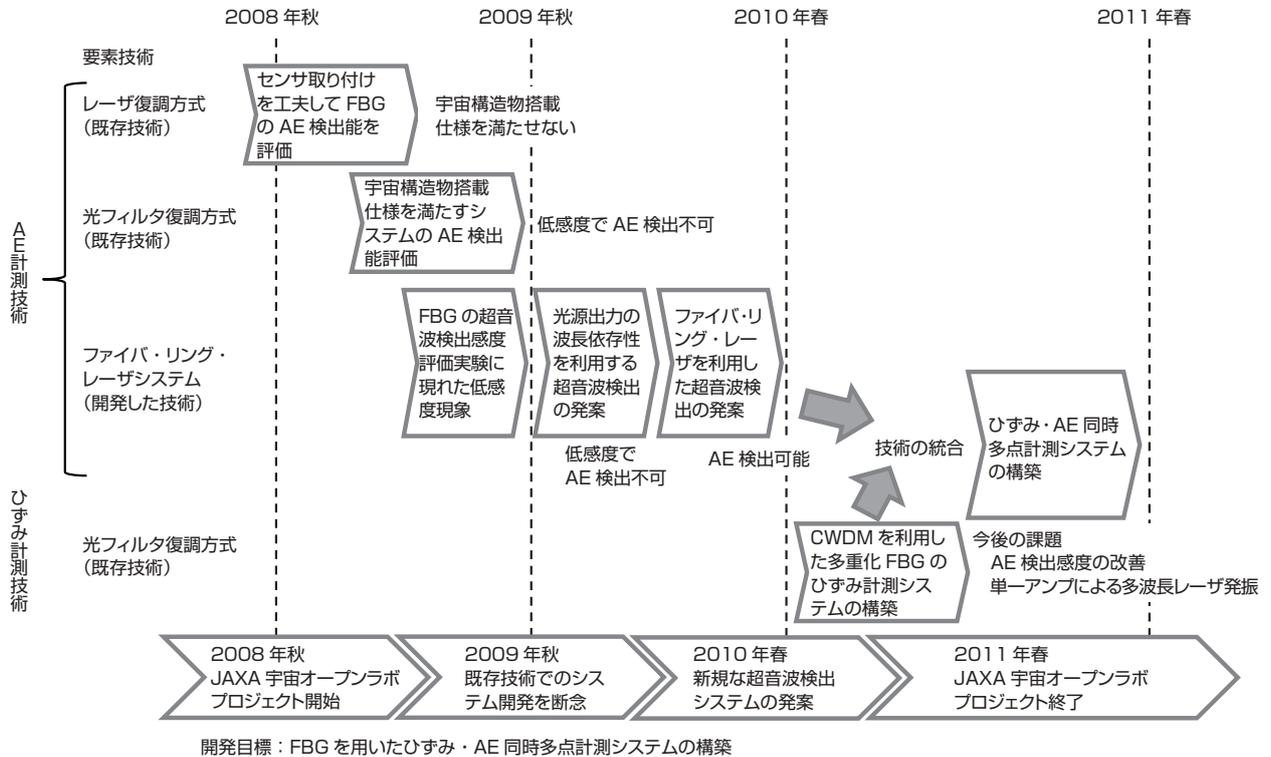


図 11 本研究開発の展開

表2 本研究開発で採用されたFBGを用いたAE計測技術の特徴

	レーザ復調方式	光フィルタ復調方式	開発した復調方式 (ファイバ・リング・レーザシステム)
AE計測能	○(図3を参照)	×(AEとバックグラウンドノイズの識別不可)	○(図8を参照)
ロケット搭載仕様への適用性	×	○	○
ひずみ同時計測への拡張性	×(注1)	○(注2)	○(注2)
システム価格(注3)	600万円程度	100万円程度	50万円程度

(注1) ひずみ計測用に広帯域光源を追加する必要がある。

(注2) 一つの光源でAEとひずみの同時計測が可能。

(注3) 1チャンネルAE計測システム構築時の費用で、ひずみ計測機能を含めない。

かった微小な振動成分を検出できた。また、これまではひずみゲージと圧電センサの二つを用いてひずみとAE計測を行ってきたが、このシステムを用いることで一つのFBGセンサでひずみとAEを同時に計測できた。

6 まとめ

波長変調型光ファイバセンサであるFBGを用いて、AEおよびひずみの同時多点計測が可能なシステムの開発を目的にこの研究は開始され、図11に示す展開を経た。研究開始当時はFBGをセンサとするAE計測技術が未熟で、その検出の可能性も実証されていない状況であった。そこでこの研究は、初めにFBGによるAE検出の可能性の実証と従来技術を利用した宇宙構造物搭載仕様を満たすシステムによるAE計測を試みた。FBGは優れたAE検出能を有したが、従来技術システムでは十分な検出感度が得られなかった。だが偶然にも実験中の操作ミスから新しいAE計測法を見いだすことができた。ここで新たに開発されたシステムは、ファイバ・リング・レーザに組み込んだ光アンプが有する光利得の波長依存性を利用して、FBGが受ける機械的振動から超音波振動までの広帯域振動をレーザ強度変化として検出することができる。この研究で採用されたAE計測に関するこれらの要素技術の特徴を表2にまとめた。この研究では最終的にファイバ・リング・レーザシステムに光フィルタ復調法によるひずみ計測技術を統合させて、ひずみ・AE同時多点計測システムを構築した。

これまで市販されてきたFBGを用いた構造物健全性評価用システムでは、サンプリング速度が最大でも1kHz程度で、周波数20kHzを超えるAEを検出することはできない。一方、このシステムは最大2MHzまでのAEを検出できることを確認している。さらにこのシステムはこれまでのFBG振動検出システムと比較してとても軽量、小型であり、かつ安価に作製できる特長がある。しかし、下記の技術課題が残っている。一つの光アンプか

ら構成されるファイバ・リング・レーザでは安定した多波長レーザ発振が実現できず、FBGセンサごとに一つの光アンプを要している。また圧電センサと比べてAE計測時のしきい値レベルが高いため、現状のシステムでは圧電センサよりもAE検出感度が低い。今後、これらの技術的な問題を改善しながら、開発されたシステムを宇宙構造物のみでなく一般産業機械等広い応用分野へ適用できるように研究を展開していきたいと考えている。

参考文献

- [1] 陳山 鵬: 回転機械の振動診断の最新技術と動向, 検査技術, 17 (3), 29-35 (2012).
- [2] G. Wild and S. Hinckley: Acousto-ultrasonic optical fiber sensors: overview and state-of-the-art, *IEEE Sensors Journal*, 8, 1184-1193 (2008).
- [3] W.J. Staszewski, C. Boller and G.R. Tomlinson: *Health Monitoring of Aerospace Structures : Smart Sensor Technologies and Signal Processing*, 29-73, Wiley, West Sussex (2004).
- [4] M. Majumder, T.K. Gangopadhyay, A.K. Chakraborty, K. Dasgupta and D.K. Bhattacharya: Fibre Bragg gratings in structural health monitoring - Present status and applications, *Sensors and Actuators A-Physical*, 147, 150-164 (2008).
- [5] A. Othonos: Fiber Bragg gratings, *Review of Scientific Instruments*, 68, 4309-4341 (1997).
- [6] M.A. Davis and A.D. Kersey: All-fiber Bragg grating strain-sensor demodulation technique using a wavelength-division coupler, *Electronics Letters*, 30, 75-77 (1994).
- [7] N. Takahashi, K. Yoshimura, S. Takahashi and K. Imamura: Development of an optical fiber hydrophone with fiber Bragg grating, *Ultrasonics*, 38, 581-585 (2000).
- [8] H. Tsuda, K. Kumakura and S. Ogihara: Ultrasonic sensitivity of strain-insensitive fiber Bragg grating sensors and evaluation of ultrasound-induced strain, *Sensors*, 10, 11248-11258 (2010).
- [9] S. Kojima, A. Hongo, S. Komatsuzaki and N. Takeda: High-speed optical wavelength interrogator using a PLC-type optical filter for fiber Bragg grating sensors, *Proc. SPIE*, 5384, 241-249 (2004).
- [10] J-R. Lee, H. Tsuda and Y. Akimune: Apodized fibre Bragg grating acousto-ultrasonic sensor under arbitrary strain using dual Fabry-Perot filters, *Journal of Optics A-Pure and Applied Optics*, 9, 95-100 (2007).
- [11] H. Tsuda, E. Sato, T. Nakajima, H. Nakamura, T. Arakawa, H. Shiono, M. Minato, H. Kurabayashi and A. Sato: Acoustic emission measurement using a strain-insensitive fiber Bragg grating sensor under varying load conditions, *Optics Letters*, 34, 2942-2944 (2009).
- [12] H. Tsuda: A Bragg wavelength-insensitive fiber Bragg grating ultrasound sensing system that uses a broadband light and no optical filter, *Sensors*, 11, 6954-6966 (2011).
- [13] 津田 浩: FBG振動検出システム, 該システムを用いた装置および振動検出方法, 特開2011-196744.
- [14] H. Tsuda: Fiber Bragg grating vibration-sensing system, insensitive to Bragg wavelength and employing fiber ring laser, *Optics Letters*, 35, 2349-2351 (2010).
- [15] 中島富男, 佐藤英一, 津田 浩, 佐藤明良, 川合伸明: 多重化したFBGセンサによるひずみとAE同時計測システムの開発(固体ロケットモータ複合材チャンバの構造ヘルスマニタリングを目的として), *日本機械学会論文集(A編)*, 78, 728-741 (2012).

執筆者略歴

津田 浩（つだ ひろし）

1994年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。同年東京大学先端科学技術研究センター助手。1995年通商産業省工業技術院物質工学工業技術研究所入所。2001年独立行政法人産業技術総合研究所スマートストラクチャー研究センター、2005年から計測フロンティア研究部門、2010年から同研究部門構造体診断技術研究グループ長。光ファイバを利用した非破壊検査技術の開発に従事。この論文では計測技術の開発を担当した。



佐藤 英一（さとう えいいち）

1985年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了、同年宇宙科学研究所入所。2003年の宇宙航空研究開発機構統合を経て、現在、独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所教授。この論文では宇宙構造物検査への光ファイバセンサ技術の推進と研究全体の管理・運営を担当した。



中島 富男（なかじま とみお）

1987年筑波大学大学院にて工学修士取得。同年日産自動車株式会社入社。2000年株式会社IHIエアロスペース、2005年より株式会社IHI検査計測。現在、IHI検査計測研究開発センター課長。この論文では計測システムの工学系の設計・製作と実験計測を担当した。



佐藤 明良（さとう あきよし）

1977年青山学院大学理工学部化学科修了。日産自動車（株）宇宙航空事業部、（株）IHIエアロスペースで宇宙機器の非破壊信頼性評価技術を担当。2009年から（株）IHIエアロスペース技師長。この論文では計測システムの電気系の設計・製作と実験計測を担当した。



査読者との議論

議論1 全体評価

コメント1（一村 信吾：産業技術総合研究所）

この論文は、著者がこれまで進めてきたFBGセンサシステムの開発と宇宙構造物への応用展開可能性を記述したもので、主な成果はFBGを用いてひずみ・AE同時計測が実現できたことにあります。その中でも、FBGを用いてAEを計測する新しい技術を開発できたことに高い価値があると判断しました。ただし、シンセシオロジー誌の主眼である構成論的アプローチに関してより明確に記述いただく必要があると考えます。

コメント2（田中 充：産業技術総合研究所）

紆余曲折を経ていて、読み応えがあります。紆余曲折のダイアグラムを示すとわかりやすいのではないのでしょうか？

議論2 目標設定・章題の問題

コメント1（田中 充）

高感度化ではなく、「周波数領域での複合化あるいは多機能化」がポイントでしょうか？だとすると、高感度化関連の用語が頻繁に出てきており、誤解を招きやすいので、「はじめに」の記述も含めて、少し整理してはいかがでしょうか？

回答1（津田 浩）

この研究での最大の成果はFBGを用いた高感度でコンパクトなAE計測システムの開発です。AEとひずみの同時計測技術である周波数領域での複合化技術については、この研究で開発したAE計測技術に既存のひずみ計測技術を統合させたとご認識下さい。

コメント2（一村 信吾）

章題ですが

4 FBGを用いたAE計測システムの開発

4.1 レーザ復調方式によるAE計測

の方が理解しやすいように思います。いかがでしょうか？

回答2（津田 浩）

4章と4.1節のタイトルをご指摘のとおり修正しました。

またこの修正に伴い、4.2節のタイトル「光フィルタ復調方式によるAE計測の試み」を「光フィルタ復調方式によるAE計測」に修正しました。

議論3 用語の問題

コメント1（一村 信吾）

第2章で「損傷許容設計」と「スマート構造体」の用語が出てきますが、相互関係が明確ではありません。前者に基づく構造体と後者との関係に関して補足的な説明を足して下さい。

回答1（津田 浩）

第2章の第1パラグラフに損傷許容設計とスマート構造体に関する補足説明を追加しました。

論点4 個別要素の記述の問題

コメント1（一村 信吾）

既存の振動測定技術であるひずみゲージ、圧電センサ等の適用範囲と問題点はこの論文に記述されています。目的とするFBGセンサとこれらセンサの特徴、適用範囲等を比較する表を作成し付け加えると読者の理解がより深まります。ご検討下さい。

回答1（津田 浩）

ご指摘のとおり、第1章の第4パラグラフに各センサの特徴を表した表1を追加しました。

併せて理解を助けるための注記も加えました。

コメント2（一村 信吾）

3.1節はFBGの原理とセンサ機能という題名になっていますが、原理の説明はありません。また、文中に「放射線環境での利用には時間的制約があるがー」というか所がありますが、これは第1章の記述中にある「光ファイバセンサは上記した電気センサの問題を解決するー」という記述か所と矛盾した印象を与えます。整合性を考えて記述して下さい。

回答2（津田 浩）

ご指摘を受け第3.1節の題目を変更、および同節第1パラグラフの最後に整合性を図るための文章を追加しました。

コメント3（田中 充）

光フィルタ復調方式とレーザ復調方式が対比されていますが、その意味がよくわかりません。簡単に述べるか、または、この対比が本質

的ではないようでしたら、まとめて削除してはどうでしょうか？最終判断はお任せします。

回答3（津田 浩）

3.1 節第 2 パラグラフでは、光フィルタ復調方式がブラッグ波長の動的变化を計測する手法で、レーザ復調方式が超音波検出手法であると解釈される記述になっていました。ご指摘のとおり、よく意味のわからない文章になっていたと思います。そこで光フィルタ復調方式とレーザ復調方式の簡単な説明、および両方式がブラッグ波長の動的变化を計測する手法であることを明記する修正を行いました。

論点5 構成学上の問題

質問・コメント1（一村 信吾）

この新しい技術を見いだす（実現する）に至ったプロセス、研究アプローチ法を、4.3 節において構成的に書き直して記述いただくことができるでしょうか。つまり、偶然に気づいた「光源の光出力の波長依存性を利用する」方式が、どのような思考過程、検討過程を経て現実に利用できる技術として実現できるに至ったかを、構成的に書き下していただくことかと思えます。それが他の分野の研究者に対しても普遍性を持つ価値の高い研究アプローチ法になると思われますので、検討をお願いします。

回答1（津田 浩）

第 4.3 節の第 3 パラグラフを修正し、そこに図 5 (a)、(b) を説明のために追加しました。また第 6 章に図 11 を追加して、この研究の構成・展開をまとめました。

質問・コメント2（田中 充）

- ①リングレーザに至った経緯をもう少し書き込んではいかがでしょうか？
- ②図4では波長可変レーザを光源としておりますが、図10では複数の光アンプから構成されるリングレーザが光源になっているという理解でよいでしょうか？
- ③そして、周波数バンド割り当ての問題等は“今後の問題”という理解でよいでしょうか？であれば、図4と図10では、「現状の到達点」とこれからの構成学上戦略とに分けて描いてはどうでしょうか？

回答2（津田 浩）

- ①リングレーザ発案に至る紆余曲折のダイアグラムを第6章に図11として、また第4.3節の第3パラグラフにリングレーザに至る経緯を記した文章、ならびに解説のための図5 (a)、(b) を追加しました。
- ②そのとおりです。光アンプから放出される微弱な広帯域光を利用して、FBGのブラッグ波長における狭帯域光を繰り返し増幅することによりレーザを得ています。
- ③「周波数バンド割り当ての問題等」のご指摘ですが、開発者一同は

図10のシステムはFBGセンサごとにアンプを設けるのではなく、一つの光アンプを用いて実現したいと考えております。これまでのシステムと開発システムの課題を図11に記しました。

質問・コメント3（一村 信吾）

この論文は、表 1 の FBG センサを宇宙・航空分野で展開するため、表 1 で注記を加えた課題（特に注 2）を克服するための技術開発について記述することが主眼となります。FBG による AE 計測に関する技術課題は 3.2 に、新しいシステムは 4 に記述され、それらをまとめる形で図 11 が加えられていますが、今一つ課題と解決策の関係が明瞭でない印象があります。

については、「宇宙・航空分野における FBG を用いた各種 AE 計測法の特徴」に関する表を新たに加える等を検討して下さい。その際、既存技術の位置付けと開発技術の特徴をより明確にするための性能仕様の記述の仕方も含めてご検討下さい。

回答3（津田 浩）

ご指摘いただいたとおり、表 2 を 6 章「まとめ」に追加しました。

質問・コメント4（一村 信吾）

上記に示した表 2 等、この技術で開発した新しい復調方式の位置付けが明確になった上で、新たに追加いただいた図 11 を見てみますと、

・ファイバ・リング・レーザシステムによる AE 計測性能の実現については位置付けを理解することが容易ですが、技術の統合を図った・CWDM を利用した――

に関しては、(表1でFBGによる歪み計測に関しては課題が無いことが記されているので) 何の課題の解決を目指したのか、容易に理解できません。

これらを踏まえて、表 1 に注を各加えるなり、または表 2、図 11 を再整理する等して、よりわかりやすい構成的な研究アプローチ法を記述していただけないか。

回答4（津田 浩）

宇宙オープンラボの当初の開発目的は FBG を用いた AE・ひずみ同時多点計測システムの開発です。AE 計測技術とひずみ計測技術を合体させて最終システムを構築したイメージがわかるように、表 1 に FBG はひずみと超音波・AE 同時計測が可能であることを示す欄を追加し、図 11 も各要素技術が AE 計測またはひずみ計測に対応するかを明記するように修正しました。ひずみ計測は既存技術を流用していますが、図 10 に示したように AE 計測システムと同じ光源を利用していることから、ひずみ計測機能を付与してもシステムをコンパクトに保つことができます。このような特徴を表 2 にも追加しました。またこの論文にも FBG による AE・ひずみの同時多点計測を明確にするように表現を一部修正しました。