光ファイバセンサによる極低温でのひずみ計測技術と
その航空宇宙分野における応用^{*1}Aerospace Application of Fiber Optic Strain Measurement Technology
in Cryogenic Environments水谷 忠均^{*2}・武田 展雄^{*3}
Tadahito MIZUTANI and Nobuo TAKEDA**Key Words :** CFRP, Fiber Bragg Grating, Strain Measurement, Embedded Sensor, Cryogenic Environment

Abstract : Strain and temperature measurement, especially in cryogenic environments, was studied using fiber Bragg grating (FBG) sensors for the purpose of the aerospace structural health monitoring. Although the relationship between the applied strain and the Bragg wavelength shift was the same as that at room temperature, the temperature-wavelength relationship became non-linear under cryogenic environment. In order to show the applicability of the sensor in aerospace applications, FBG strain and temperature sensors were embedded in a composite liquid hydrogen tank and measured in the cryogenic and pressurized environment. Encapsulated and small-size temperature sensors were used in this article and the temperature drift of the strain sensor was compensated by using the output of the temperature sensor. It was revealed throughout the experiment that the optical power loss could be critical in the case of existing large temperature difference. The practical solution for this issue was also discussed in this article.

1. は じ め に

ひずみ計測は材料特性を定量的に評価するための基本的な計測技術であり、構造物の応力解析にも必要不可欠な技術である。ひずみ計測には一般的に金属抵抗の変化を利用した箔状のひずみゲージが使用される。ひずみゲージを使用した多くの計測技術が既に確立されており、様々な分野で活用されている。航空宇宙分野においてもひずみゲージは広く活用されており、大規模な構造試験においては何千ものセンサが使用されることになる。

航空宇宙分野における構造ヘルスマニタリング (SHM) とは、運用中、もしくは製造段階からの機体構造の健全性を継続的に評価し、安全かつ効率的な運用を目指す概念である。ひずみ計測はその根幹を支える技術の1つでもある。しかしながら、現状では運用中の航空機または宇宙機において何千点ものひずみを継続的に計測することは現実的でない。理由として主に2つの要因が考えられる。まずは重量や空間的な制約である。一般的な箔ひずみゲージの重量はごくわずかなものであるが、ひずみゲージは直列的な接続ができない、すなわち1本の配線につき計測点は1点であるために、何千ものセンサを使用する場合はその重量は無視できないものになる。さらに配線や計測機器に必要なス

ペースも膨大になり、特に限られたペイロード重量、空間、電力で運用される航空宇宙機では制約が大きくなる。また別の要因としては、計測の確度も考えられる。ここで確度とは、真値(計測対象の真のひずみ値)と計測される値との差である。ひずみゲージは分解能が $1\mu\epsilon$ 程度で非常に高精度なセンサではあるが、いわゆるゼロドリフトと呼ばれる現象により計測誤差は経時的に増大する。これはホイートストーンブリッジを構成する電気系の安定性、センサや接着材料の疲労特性、耐環境性などが複雑に絡んだ問題であり、計測系全体での確度を長期間にわたって保証するのは難しい。以上の要因に加えて費用対効果なども考慮すると、既存のひずみ計測技術によって機体全体を監視可能なシステムを構築することは難しい。

これらの問題を解決し、SHMにおけるひずみ計測センサとして有望視されているものが光ファイバセンサである。ひずみゲージと比較して光ファイバセンサには、小型、軽量、耐電磁干渉性、低損失等の特長がある。定量的なひずみ計測が可能な光ファイバセンサとしては、主にファイバブラッググレーティング (FBG) を利用した多点型センサと、光ファイバ内の散乱現象を利用した分布型センサの2つに大別できる。FBGセンサの場合は1本の光ファイバあたり数点から数千点の多重化が可能であり¹⁾、分布型センサの場合は数cmの空間分解能を持ち、かつ計測距離が数kmに及ぶものもある²⁾。ひずみゲージの場合は、1本の配線あたり1つのセンサしか接続できないことを考えると、光ファイバセンサでは重量や空間的な制約は格段に小さく

^{*1} © 2010 日本航空宇宙学会

平成 21 年 6 月 16 日原稿受付

^{*2} Fraunhofer Institute for Non-destructive Testing^{*3} 東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻

なる．また，計測の基準が光の波長（または周波数）であるため，電気抵抗値を基準とするひずみゲージ計測と比較すれば校正が容易でより高い確度が期待できる．しかしながら，センサ等の疲労特性や耐環境性については，ひずみゲージと同様に大きな誤差要因となりうるため十分な配慮が必要である．

近年の航空宇宙分野では複合材料構造が多用されつつあるが，従来の金属材料構造と比較すると，その破壊挙動を予測することは難しい．これは複合材料が直交異方性を持つ層の重ね合わせによって構成されていることに起因している．従って SHM 技術の必要性が広く認められており，例えば巨視的な観点からのひずみ計測³⁾や，微視的な観点からの損傷検出技術⁴⁾など，光ファイバセンサによる計測技術が数多く提唱されている．著者らは過去に FBG センサによる再使用型ロケット実験機に搭載された液体水素タンクのひずみ計測技術に関する報告を行った⁵⁾．ここでは飛行試験においてタンク表面のひずみを貼り付け型のセンサによりリアルタイムで計測したが，製造時から運用時までの一貫したひずみ計測，熱残留応力の評価，微視的損傷検出等を行うためには，理想的には埋め込み型のセンサを適用すべきである．ただし，埋め込み型のセンサは外的要因によって壊れる可能性が低いという利点がある一方で，万が一壊れた場合の修復性には問題があり，実用面での課題が残る．

以上の背景から，本論文においては埋め込み型 FBG センサの極低温におけるひずみ，および温度に対する挙動について注目する．特に極低温における温度計測に関しては前例が少なく，FBG による液体窒素温度以下の温度計測はごく数例である⁶⁾．それに加えて，温度変化の生じる環境においてのひずみ計測では常に計測誤差，いわゆる見かけひずみ（apparent strain）の問題が生じるため，実用的で簡便な温度補償技術についても述べる．この極低温計測の基礎実験を踏まえた上で，FBG センサを複合材料製の液体水素タンクへ適用し，極低温加圧試験におけるひずみ，温度計測の実証実験を行った．さらに，そこで得られる結果から埋め込み型 FBG センサの実用性，解決すべき問題点などを議論する．

2. 光ファイバセンサによるひずみ，温度計測

FBG センサはシングルモードの光ファイバに周期的な屈折率変調を施した特殊な光ファイバである．屈折率変調を任意に設定することにより，センサから反射される光の中心波長，帯域幅，反射率等を調整することが可能である．ひずみ計測に使用する FBG は通常，反射帯域幅が 0.2～0.5 nm 程度である場合が多い．例えば C バンド帯（1530～1580 nm）の光源を使用した波長分割多重に基づいた計測の場合，センサの配置を適切に組み合わせることで数十個の FBG センサを多重化することが可能である．

FBG からの反射光の中心波長はブラッグの条件に従う．傾斜の付いていない FBG について，ブラッグ波長 λ_B は次式で求められる．

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \quad (1)$$

ここで， n_e は光ファイバの有効屈折率であり， Λ は格子間隔，つまり屈折率変調の周期である．ひずみや温度変化が FBG センサに加わると，センサの格子間隔や屈折率が変化することによってブラッグ波長も変化する．その変化量は以下のように求めることができる^{7, 8)}．

まず，センサが温度一定の状態ではひずみのみが加わった場合を考える．簡単のため光ファイバの軸方向のみに応力が加わっている状態を想定し，この時の初期状態 λ_{B_0} からのブラッグ波長変化量 $\Delta\lambda_e$ は軸方向のひずみ ε を用いて次のように表現できる．

$$\frac{\Delta\lambda_e}{\lambda_{B_0}} = C_e \varepsilon \quad (2)$$

ここで，定数 C_e は

$$C_e = 1 - \frac{n_{e0}^2}{2} \{p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})\} \cong 0.78 \quad (3)$$

で定義される光ファイバ固有の定数であり， n_{e0} は光ファイバにひずみと温度変化が加わっていない状態での有効屈折率， ν は光ファイバのポアソン比， p_{11} ， p_{12} はポッケルス定数と呼ばれる光弾性効果に関する定数である．この定数 C_e を予め校正しておくことで，温度変化が生じない環境でのひずみ計測が容易に可能となる．

次に，センサが温度変化 ΔT のみの影響を受ける場合を考える．この場合，ブラッグ波長変化量 $\Delta\lambda_T$ は以下の式で表される．

$$\frac{\Delta\lambda_T}{\lambda_{B_0}} = C_T \Delta T = \left(\alpha + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \right) \Delta T \quad (4)$$

ここで， α は光ファイバの線膨張係数 ($0.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) であり⁷⁾，第 2 項は温度変化に対する屈折率変化に関連している．ひずみ計測と同様に，予め右辺を校正しておくことで温度計測が可能になる．文献 8) によれば $C_T = 6.7 \times 10^{-6} (\text{K}^{-1})$ と定数値が得られるが，後述するように，極低温の計測では C_T を定数と見なすことが難しい．

最後に，ひずみと温度変化が FBG センサに同時に影響する場合を考える．この場合，ブラッグ波長変化量 $\Delta\lambda$ は式 (2) と式 (4) を足し合わせたものになる．

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{B_0}} = C_e(\varepsilon - \alpha\Delta T) + \left(\alpha + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \right) \Delta T \quad (5)$$

ただし，右辺の第 1 項は ε から熱ひずみの成分を引いたものである．

構造ヘルスマモニタリングのセンサとして FBG を選択する場合，センサは温度変化のある環境で使用されることが一般的であり，センサの出力はひずみと温度変化の両方の影響を受ける．ひずみ計測から温度変化の影響を取り除く最も単純な方法は，2 つの FBG センサを用いて，そのうちの 1 つをひずみが加わらない状態で同じ温度変化が与え

られる環境に設置することである．これはひずみゲージの 2 ゲージ法に類推される手法であるが，FBG の場合には温度情報も同時に取得できる点で異なる．すなわち，構造体に貼り付け，もしくは埋め込まれた FBG センサは式 (5) に，ひずみが加わらない状態の FBG は式 (4) に従い中心波長が変化する．式 (4) の C_T を上記の定数値と見なした場合，温度変化による見かけのひずみは，補正を行わない場合では $6.3(\mu\epsilon \cdot K^{-1})$ であるが，補正を行うことにより $-0.4(\mu\epsilon \cdot K^{-1})$ となり格段に改善する．

この手法の欠点としては，温度計測用の FBG を余分に用意する必要があることと，2 本の光ファイバを近傍に設置する施工の困難さが考えられる．しかし，温度補正されたひずみと温度を容易に同時計測することが可能な手法として，その適用範囲は広い．

3. 極低温環境における特性

極低温環境における FBG の特性を取得するために，液体ヘリウム温度における FBG によるひずみ計測，および液体ヘリウム温度から室温までの温度計測を行った．

3.1 ひずみに対する特性 まずは，液体ヘリウム温度における FBG のひずみ計測について説明する．ここでは，FBG センサを貼り付けた CFRP 試験片の引張試験を行い，ひずみに対する FBG の中心波長変化を計測した．試験片は CFRP 一方向積層板を短冊状に切り出したものである．使用した光ファイバはクラッド径が $125\mu m$ のシングルモード光ファイバに FBG を書き込んだものである．センサ長は 10 mm であり，光スペクトラムアナライザで実測した室温での中心波長は 1551.468 nm ，帯域幅（半値幅）は 0.256 nm である．光ファイバはポリイミドの被覆で保護されており，被覆を含めた外径は $150\mu m$ である．ひずみ値の取得のために箔ひずみゲージを同じく試験片表面に貼り付けた．

試験片を極低温チャンバ付きの材料試験機に取り付け，光ファイバをチャンバ内から延長して取り出し，ASE 光源と光スペクトラムアナライザからなる計測系に接続した．チャンバ内を液体ヘリウムで充填し，一定期間が経過した後にひずみゲージのバランスをとり準静的な引張試験を行った．引張試験の間，FBG の反射光スペクトラムを光スペクトラムアナライザにより計測し，計測されたスペクトラムから中心波長を算出した．

計測した結果を第 1 図に示す．横軸はひずみゲージで計測したひずみ値，縦軸は FBG の中心波長変化率であり，これは式 (2) の左辺に相当する値である．ここでの基準となるブラッグ波長 λ_{B_0} は，ひずみゲージのバランスをとった時点で計測された中心波長である．比較のため，常温で計測された値と式 (2) から求められる理論値も併せて示す．また，この結果から求められるゲージファクター C_e を第 1 表に示す．液体ヘリウム環境においても FBG の中心波長はひずみに対して線形に変化し， C_e も常温での計測結果や理論値ともよく一致することが確認できた．以上のことから，FBG によるひずみ計測は極低温環境においても常温環境と同様に適用可能である．

第 1 図 液体ヘリウム環境における FBG のひずみに対する中心波長変化

第 1 表 FBG ひずみセンサのゲージファクター C_e

Theoretical	Room temp.	Liquid helium temp.
0.78	0.78	0.78

第 2 図 複合材料に埋め込み可能な FBG 温度センサ

3.2 温度に対する特性 次に，FBG センサの極低温での温度特性について説明する．本論文では，複合材料の中に埋め込み可能な FBG 温度センサを試作し，その温度特性を室温から極低温まで計測した．第 2 図に埋め込み可能な FBG 温度センサの模式図を示す．このセンサは FBG 全体がポリイミドのチューブで覆われている．チューブの両端はエポキシ系接着剤で封をしてあり，チューブ内の空気は液化を防止する目的でヘリウム置換されている．また，光ファイバは FBG 終端付近で切断されていて，ポリイミドチューブにひずみが加わってもチューブ内の FBG にはひずみが加わらない．試作した FBG 温度センサの全長（ポリイミドチューブの全長）は 20 mm であり，外径は約 $200\mu m$ である．使用した FBG の仕様は 3.1 節のものと同様である．なお，さらに外径の細い光ファイバセンサ⁹⁾を使用した場合は，外径をより小さくすることが可能である．

この FBG 温度センサの極低温における特性を取得するためにスペースチャンバを用いた実験を行った．センサをスペースチャンバの中に設置し，3.1 節の実験と同様に光ファイバをチャンバ外部に延長し，ASE 光源と光スペクトラムアナライザからなる計測系に接続した．反射光スペクトラムはパーソナルコンピュータからの遠隔制御によって

第3図 極低温における FBG の温度に対する中心波長変化

連続的に計測し、熱電対を用いてチャンバ内の温度を計測した。実験はチャンバ内を真空に引き、室温から 10 K に向かって冷却を行った。

第3図はチャンバ内の温度と、FBG の中心波長変化率の関係を示したものである。ここでの中心波長変化率は式(4)の左辺であり、その基準値 λ_{B_0} は 300 K における計測値である。FBG の中心波長は温度が低下すると短波長の方向にシフトする。さらに、極低温における温度に対する波長変化は室温付近と比較して小さく、非線形な変化をしていることがわかる。第3図に示すように、300 K 以下においてこの関係は2次関数でよく近似できる。ここで示した近似曲線を用いて、測定機器の中心波長分解能が 1 pm とした場合の温度分解能を算出すると、常温では 0.1 K 程度の温度分解能を持つが、液体窒素温度では 0.3 K、液体水素温度では 1.2 K となる。液体窒素温度以下では温度分解能が急激に低下するので注意が必要である。線膨張係数がより大きい材料を利用して極低温における FBG の熱膨張（収縮）を増幅し、温度分解能を向上させることが可能であるが^{6, 10)}、本研究では小型で埋め込み可能であるという特性を重視して第2図に示すセンサを提案する。

4. 液体水素タンクへの適用

前節の結果を踏まえて、埋め込み型 FBG センサを複合材料製の液体水素タンクへ適用し、タンクの液体水素充填加圧試験において温度、ひずみ計測の実証実験を行った。

4.1 供試体 使用した複合材料製液体水素タンクはライナ材料に LCP (Liquid Crystal Polymer) を使用しており、再使用型のロケットへの適用を目的として、従来の金属ライナを用いた複合材料製タンクよりもさらなる軽量化、信頼性向上を目指した評価用のタンクである。このタンクの内容量は 38 L、フープ部の直径は 42 cm である¹¹⁾。

使用した FBG センサはひずみが 6 点、温度が 3 点である。センサの配置図を第4図に示す。このうち、ひずみセンサは多重化されており、第4図の S1- j 、S2- j ($j = 1, 2, 3$) は、それぞれ1本の光ファイバに3点の FBG を加工し

第4図 FBG センサの配置図

第5図 FBG センサを埋め込んだ複合材料製液体水素タンク（第4図の Back View 方向）

第6図 液体水素充填加圧試験における FBG 計測系

たものであることを示している。センサの外形寸法は3.1節で使用したセンサと同様であり、温度センサは第2図に示した埋め込み型のセンサである。これらの FBG センサを成型が終了した後のタンク表面に配置し、光ファイバの上部を炭素繊維のドライファブリックで覆い、ウェットレイアップ法で再度成型した。これにより、光ファイバはタンク表面に接着されるとともに、炭素繊維の薄い層によって覆われる。言い換えれば、センサの接着性を向上させることと、光ファイバを保護し以後の作業工程を効率的にすることを同時に実現できる。施工後のタンクは断熱材で覆われるため、光ファイバはタンク上部に接続される配管に沿わせて外部に取り出し、計測機器と接続ができるようにした。第5図はセンサ施工が終了した時点での写真である。

FBG の計測系は第6図に示すとおり ASE 光源と光スペクトラムアナライザを中心に構成されている。光チャネ

第 7 図 液体水素充填加圧試験におけるひずみ計測 (S2-1)

第 8 図 極低温試験中の温度履歴

ルセクタを使用することにより、複数の光ファイバの中から計測する光ファイバを任意に切り替えることが可能である。スペクトラムアナライザと光チャネルセクタをソフトウェアにより連動させ、チャンネルを 10 秒間隔で自動的に切り替えて反射光スペクトルを連続的に収録した。

加圧試験は 2 日間に渡って全部で 4 回実施し、最初の加圧試験は液体窒素をタンクに充填した状態で、残りの 3 回は液体水素を充填した状態で行った。以下に示す FBG の計測結果は第 1 図および第 3 図の計測結果を校正値として用い、実験開始時の計測値をひずみの基準点 (ゼロ点) としたものである。実験開始時においてタンク内部には液体は何も充填されておらず、タンク表面温度は 288.6 K であった。

4.2 計測結果 実験で計測されたタンクの内圧とひずみ値 (S2-1) の関係を第 7 図に示す。図に示したのは液体水素を充填した状態での加圧試験 3 回分のデータである。ひずみの計測値は温度補正されており、補正に使用した温度センサは S2-1 の近傍に埋め込まれた T1 である。ひずみの圧力に対する変化は線形的であり、各試験におけるひずみ値の再現性も高い。このことは、タンクが正常な状態であることを示すと同時に、本実験の FBG センサ設置手順が妥当であるということも示唆している。

次に、温度計測の時間による推移を第 8 図に示す。図示

したデータは実験初日に計測された温度履歴であり、液体窒素充填状態で第 1 回目の加圧試験、液体水素充填状態で第 2 回目の加圧試験が行われた。すべての試験期間において埋め込み型 FBG 温度センサの計測が行われ、加圧試験中も外力の影響を受けずに安定した計測値を示し、温度センサとして正確に機能することが示された。

このように計測結果は良好であったが、FBG からの反射光スペクトルを詳細に確認した結果、反射光強度がタンクの温度変化に対して大きく変化していることが判明した。過度の反射光強度低下が発生した場合には光ファイバセンサはその機能を失う。次節においてその原因について考察を加え、実用的な解決手法を提案する。

5. 埋め込みによる光強度損失とその低減方法

低損失な信号伝達が可能であることは光ファイバセンサの利点の 1 つである。1550 nm 帯域で使用されるシングルモード光ファイバの伝送損失は一般的に 0.3 dB/km 以下であり、計測距離が短い SHM の用途では光強度損失による計測への影響は無視することができる。さらに、FBG によるひずみ計測は光の波長 (周波数) 変動を基準にした計測なので、理想的には光強度変化によるひずみ精度への影響は全くない。

しかしながら、前節の実験のように光ファイバ素線を構造物中に埋め込んだ場合、マイクロベンディング損失が生じて状況によっては光強度が著しく低下する。特に複合材料中に埋め込まれたセンサは強化繊維との接触がその原因として考えられ、本論文の実験においては、外力や温度変化が生じたときにその影響が顕著になる傾向が見られた。第 9 図に前節の実験で得られた反射光スペクトルの信号対雑音比 (S/N 比) とタンク温度の関係を示す。これは第 8 図の時間軸において 60 分から 300 分の温度上昇中に計測された 3 つのひずみセンサの反射光スペクトルから算出したものであり、ここでの信号強度は反射光スペクトルのピーク波長における反射率、雑音強度は反射光ピークから十分離れた波長における反射率で定義した。温度の上昇とともに S/N 比が向上していることが読み取れる。また、光ファイバの埋め込み長さが長いほど S/N 比の変化が大きい (第 2 表)。

前述したとおり、ひずみの計測精度は光強度変化には依存しないが、S/N 比が 0 dB 以下になった状態、つまり反射光強度がノイズ強度を下回ってしまった場合には中心波長を計測することは不可能であり、ひずみセンサとしての機能を失う。第 9 図で最も S/N 比の変動が大きいセンサ (S2-3) では埋め込み長さが 89 cm であるにもかかわらず、100 K の温度変化に対して 7.66 dB の光強度損失が生じている。実構造物への適用を考えた場合、埋め込み長さがさらに長くなることが予測されるため、この光強度損失を低減する必要がある。マイクロベンディング損失を低減するためには、光ファイバの比屈折率差 Δ を大きくすることが有効である¹²⁾。ここで、 Δ は光ファイバのコアの屈折率 n_1 とクラッドの屈折率 n_2 を用いて $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ で定

第9図 極低温試験中の信号対雑音比

第11図 光ファイバの比屈折率差および埋め込み方法の違いによる光強度損失の比較

第2表 極低温試験における光ファイバセンサの埋め込み長さとは信号対雑音比

センサ	埋め込み長 (cm)	損失変化 ($\times 10^{-2}$ dB $\cdot$ K $^{-1}$)
S2-1	5	0.94
S2-2	47	3.32
S2-3	89	7.66

(a) Optical power measurement with embedded fiber: I_A (b) Reference measurement: I_R

第10図 光ファイバの埋め込みによる光強度損失の測定方法

義される光学パラメータである。

以下に示す検証によって大きな比屈折率差 Δ がマイクロベンディング損失低減に対して有効であることを確認する。2種類の光ファイバ ($\Delta = 0.65\%$, 1.83% , 日立電線⁹⁾) を用意し, CFRP 一方向積層板 $[0_8]$ に埋め込んだ。このとき, 光ファイバを強化繊維に対して平行になるように埋め込んだ試験片 (TYPE 1) と垂直に埋め込んだ試験片 (TYPE 2) を作製した。それぞれの試験片には同種の光ファイバを5本ずつ埋め込んだ。光ファイバの埋め込み長さは約30 cmである。これらの埋め込みによる光強度損失を次の方法で評価した。まずは, 積層板に埋め込まれた光ファイバの片端を1550 nm 帯の光源に, 別の端をフォトディテクタに接続して透過する光強度 I_A を計測する (第10図 (a))。次に, 試験片の両端で光ファイバを切断し, 試験片に埋め込まれた光ファイバを介さずに光源からフォトディテクタへの入射光強度 I_R を計測する (第10図 (b))。この2つの光強度の差を光ファイバの埋め込みによる光強度損失と定義した。

それぞれ5本ずつの結果を平均し, 1 m あたりの損失量に換算した結果を第11図に示す。同じ埋め込み手法を比較すると比屈折率差の大きい光ファイバの損失が小さく, また, 同じ比屈折率差の光ファイバを比較すると繊維と平行に埋め込まれた光ファイバの損失が小さい。つまり, 実験結果は強化繊維の接触によりマイクロベンディング損失が発生し, 比屈折率差を大きくすることによりその影響を低減できることを示唆している。従って, 比屈折率差の大きい光ファイバを用いてなるべく強化繊維と平行方向に光ファイバを埋め込むことが, マイクロベンディング損失低減の観点からは望ましい。

6. ま と め

本論文では液体窒素温度以下の極低温環境における光ファイバセンサ, 特に埋め込み型のFBGセンサによるひずみ, および温度計測技術とその実構造物への適用可能性について述べた。

ひずみ計測に関しては極低温環境においてもひずみと中心波長変化の関係が線形であり, その傾きも室温環境と同じ値であった。温度計測に関しては, 極低温において温度と中心波長変化が非線形であり, 低温になるに従って温度分解能が低下する結果が得られた。しかし, 液体窒素温度において約1 Kの温度分解能であれば容易に計測可能である。また, 複合材料構造への埋め込みに適した極低温温度センサを提案し, さらにひずみセンサと併用することで温度変化による見かけのひずみ値を補正する手法も提案した。

これらの計測結果を基にして実構造物の極低温環境におけるひずみ, 温度計測を行った。本論文では, 波長分割多重によって多重化されたひずみセンサと温度センサを複合材料製の液体窒素タンクに埋め込み, 液体窒素充填加圧試験中の計測を行った。ひずみ計測は複数回の試験において良い再現性を示し, 温度計測も50 Kから300 Kの範囲内の温度を長時間安定して計測が可能であった。この実験において, 光ファイバの埋め込み長さが長いほど光強度が温

度変化に対してより大きく減少することが判明した。これがマイクロベンディングによる影響であり、比屈折率差の大きい光ファイバを使用し、材料の強化繊維と平行に埋め込むことで強度損失を低減できる可能性を示した。

今後は本論文の結果を応用して、埋め込み光ファイバセンサによる材料内の微視的損傷検出技術等、より多くの SHM 技術が実構造物へ適用され、その有効性が示されることが期待される。

本論文の執筆にあたり、液体水素タンクの実験においては航空宇宙研究開発機構、富士重工業(株)の協力の下、スペースチャンバを使用した実験では三菱電機(株)の協力の下、センサの設置、および計測を行った。

参 考 文 献

- 1) Prosser, W. H., Allison, S. G., Woodard, S. E., Wincheski, R. A., Cooper, E. G., Price, D. C., Hedley, M., Prokopenko, M., Scott, D. A., Tessler, A. and Spangler, J. L.: Structural Health Management for Future Aerospace Vehicles, Proc. of the 2nd Australasian Workshop on Structural Health Monitoring, 2004, pp. 1–15.
- 2) Kreger, S. T., Gifford, D. K., Froggatt, M. E., Sang, A. K., Duncan, R. G., Wolfe, M. S. and Soller, B. J.: High-Resolution Extended Distance Distributed Fiber-Optic Sensing Using Rayleigh Backscatter, Proc. SPIE, **6530** (2007), 65301R.
- 3) Betz, D. C., Thursby, G., Culshaw, B. and Staszewski, W. J.: Advanced Layout of a Fiber Bragg Grating Strain Gauge Rosette, J. Lightwave Technol., **24** (2006), pp. 1019–1026.
- 4) Betz, D. C., Thursby, G., Culshaw, B. and Staszewski, W. J.: Structural Damage Location with Fiber Bragg Grating Rosettes and Lamb Waves, Structural Health Monitoring, **6** (2007), pp. 299–308.
- 5) Mizutani, T., Takeda, N. and Takeya, H.: On-Board Strain Measurement of a Cryogenic Composite Tank Mounted on a Reusable Rocket Using FBG Sensors, Structural Health Monitoring, **5** (2006), pp. 205–214.
- 6) Wu, M. C. and DeHaven, S. L.: High-Sensitivity Cryogenic Temperature Sensors Using Pressurized Fiber Bragg Gratings, Proc. SPIE, **6189** (2006), 618900.
- 7) Steenkiste, R. J. V. and Springer, G. S.: Strain and Temperature Measurement with Fiber Optic Sensors, Technomic Publication, New York, 1997.
- 8) Hill, K. O. and Meltz, G.: Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview, J. Lightwave Technol., **15** (1997), pp. 1263–1276.
- 9) Satori, K., Fukuchi, K., Kurosawa, Y., Hongo, A. and Takeda, N.: Polyimide-Coated Small-Diameter Optical Fiber Sensors for Embedding in Composite Laminate Structures, Proc. SPIE, **4328** (2001), pp. 285–294.
- 10) Mizunami, T., Tatehara, H. and Kawashima, H.: High-Sensitivity Cryogenic Fibre-Bragg-Grating Temperature Sensors Using Teflon Substrates, Meas. Sci. Technol., **12** (2001), pp. 914–917.
- 11) Sato, E., Takeuchi, S., Higuchi, K., Naruo, Y., Inatani, Y., Arakawa, Y. and Matsuoka, S.: Development of Cryogenic Composite Tank Lined with Polymer Film, Proc. 56th Int. Astronautical Congress, 2005, IAC-05-D2.5.05.
- 12) 左貝潤一, 杉村 陽: 光エレクトロニクス, 朝倉出版, 東京, 1993, pp. 87–88.