ひずみ検出に光ファイバグレーティングを用いたボルト軸力センサの研究

岩田 弘^{*1}, 柏 美奈子^{*2}, 水谷 康男^{*2}

Axial force sensor for screw bolt using optical fiber grating for detection of strain

Hiromu IWATA^{*1}, Minako KASHIWA^{*2} and Yasuo MIZUTANI^{*2}^{*1}Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Kagawa College
355 Chokushi-cho, Takamatsu-shi, Kagawa 761-8058, Japan^{*2}SHINKO Electric Wire Co., Ltd
1298-12 Shido, Sanuki-shi, Kagawa 769-2101, Japan

Received 4 June 2015

Abstract

In this study, an axial force sensor was developed and evaluated for a screw bolt using optical fiber grating (FBG: fiber Bragg grating). This sensor has high tolerance to electromagnetic noise. Furthermore, it has a characteristic long-distance signal transmission ability because it was made using optical fiber. This washer type sensor forms a circular projection because the stress distribution in the sensor is obtained only proportional to the axial force of the screw bolt. The axial force sensor was experimentally developed for an M10 screw bolt. According to test results, the reflection wavelength shift was proportional to the axial force, implying that this sensor has excellent characteristics.

Key words : Axial force sensor, Optical fiber, Fiber grating, FBG, Screw bolt

1. 緒 言

ねじは最も重要な機械要素の一つである。その起源は 15 世紀のルネッサンス期にも遡るとされ、この千年で最高の発明とも言われる(Rybczynski, 2003)。現代のあらゆる構造物はねじなくして語れないほどである。

しかしながら、ねじの緩みは古くから知られた重要問題であり、近年でも大小含め多くの事故の原因とされている。この対策にはダブルナット締結法をはじめとする数多くの提案や製品があり、その信頼性が向上しているようではあるが、ねじの原理上から非常に解決困難な課題とも考えられる。このため、ねじの緩みメカニズムの解明には多くの研究(山本, 賀勢, 1977)がおこなわれており、また社会的な関心も高い。さらにボルト緩み監視モニタシステムについても各種の方式のセンサが用いられ、多くの製品が提案されている。

本報では、ねじの緩み監視や締結力管理等のために使用するボルト軸力センサについて、センサ内のひずみ検出に光ファイバ素子を用いた新しい方式のボルト軸力センサを提案する。

この軸力センサは、これまでのセンサのほとんどが電気式であるのに対して、光ファイバ素子を用いているため新たなメリットが得られる。これは第一に、光ファイバでは電気信号を用いていないため、電磁ノイズに対する耐性があり、その影響を受けない点である。エンジン点火時におけるスパーク電流や高圧電線付近における電磁波は電気式計測器にとってはノイズ対策に苦慮する場面である。一方、光ファイバはこの影響を全く受けないため、安定して計測が可能である。第二のメリットは、信号の長距離伝送が容易なことである。電気電子計測の場合は必ず電源が必要となることや、インピーダンスが原因の伝送損失を補うための増幅器の設置も場合によって必要となる。これに対して光ファイバは光損失が 0.2~0.3 dB/km (30~50 km で信号強度が 1/10 に低下) と非常に低損失で長距離信号伝送が可能であり、1 km を超える長距離の信号伝送も容易である。第三のメリ

ットは、複数の信号を異なる光波長に割当てることによって相互干渉することなく同時に信号を送送することが可能となるため、複数の光ファイバーセンサを1本の光ファイバーに配線することが可能であり、結果として設置が容易になることである。

この光ファイバーセンサにも各種の方式があるが、ここでは後述するファイバー・ブラッグ・グレーティング (FBG) 素子を用いた。これを用いたのは、光ファイバーFBG素子が、通常的光ファイバーを用いた後方ブルリアン散乱を計測する方式などの他の方式に比べて、十分な強度の光信号が得られ、しかも高い測定精度を得やすいという特徴を有していることに理由がある。

Fig.1 Optical fiber and FBG(Fiber Bragg Grating) device.

Fig.2 Schematic diagram of index modulation on optical fiber core at FBG device.

2. 光ファイバーFBG素子

光ファイバーはDWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing, 高密度波長分割多重方式) に代表される高速情報通信を支える素子として開発されたものである。ここで使用する光ファイバーは、図1に示したように、直径125 μmの繊維状石英ガラスであり、この軸芯部にある直径8.5 μmのコア部とその周りのクラッド部から構成されているシングルモード光ファイバーである。

この光ファイバーに各種の加工を施して光機能素子としての特性を付与することが可能であり、ここでは図1に示したような、光ファイバーFBG (Fiber Bragg Grating) 素子を用いた。この光ファイバーFBG素子は光ファイバーのコア部にエキシマレーザーなどを用いて高エネルギー加工を行い、図2に示したように、コア部の屈折率の高低を光軸方向に周期的に分布させた摂動部を設けたものである。一般に光伝搬媒質に屈折率の変化があると、そこで反射が生じる。光ファイバーFBG素子の場合、屈折率摂動の屈折率振幅 Δn は通常約0.00015と非常に小さいためこれによる反射はわずかであるが、摂動回数が大きいことこれらの反射光が結合して大きな反射を生じる。ただし、反射光が結合するのは摂動周期で光波の位相が同期した場合のみであるため、摂動周期に依存した特定の波長でのみ反射が生じることとなる。

この屈折率摂動周期を Λ とすると、光ファイバーFBG素子からの反射波長=Bragg波長 λ_B との間には、

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

の関係がある。このことから、反射波長 λ_B は摂動周期 Λ に比例することになる。

いま、光ファイバーの軸方向に何らかの力が作用したとすると、光ファイバーは石英ガラスと等しい弾性特性に従って伸縮する。このとき、コア部に形成された屈折率摂動周期も軸方向に伸縮することとなる。屈折率摂動周期 Λ の軸方向の伸縮量を $\Delta\Lambda$ とすると、このとき光ファイバーのひずみ ε は、

$$\varepsilon = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \quad (2)$$

の関係になるので、式(1)および式(2)を考慮して整理すると、光ファイバーFBG素子の反射波長の変化 $\Delta\lambda_B$ は、

$$\Delta\lambda_B = 2n\Lambda\varepsilon \quad (3)$$

として得られる。

これは $2n\Lambda$ をゲージファクターとした抵抗線ひずみゲージにおける電気抵抗の変動比とひずみの関係と同様な式である。したがって、反射波長 λ_B の変化を何らかの方法で計測することによって、光ファイバーFBG素子のひずみを推定することが可能となる。

なお、実際の光ファイバーにおける各値は、本研究において使用したシングルモード光ファイバーSMF-28e (Corning Co. Ltd.) においては、屈折率 $n=1.45$ であり、また、光ファイバーFBG素子の反射波長 $\lambda_B=1550$ nmとしたとき、摂動周期 Λ は約 0.5 μm である。

3. 軸力センサと有限要素法を用いた解析

3・1 ボルト軸力センサの基本構造

ボルト軸力の計測には、超音波を利用してボルトの伸びを計測する方法や圧電素子を用いて力を直接計測する方法、ひずみゲージを用いてボルトのひずみを計測する方法などがあるが、前章における光ファイバーFBG素子のひずみ応答特性から、抵抗線ひずみゲージと同様な構造を用いることが好都合である。ここでは、計測の汎用性を考慮して、ボルトやナットとは独立したワッシャ型のセンサとし、光ファイバーFBG素子を埋め込むために軸方向厚さを大きくした構造とする。このときワッシャ型センサ内の最大主応力は、ボルト頭部座面半径付近で、ボルト軸方向＝ワッシャ軸方向に平行な向きになるものと考えられる。したがって、ボルト軸力に対して最大のひずみ感度を得るためには、最大主応力の方向に光ファイバーFBG素子を設置することが望ましい。しかしながら、ボルト頭部座面の半径で軸方向にグレーティング長 4.0mm の光ファイバーFBG素子を設置したとき、ボルト頭部との干渉を回避して光ファイバーを引き出す必要がある。光ファイバーFBG素子は脆性材料である石英ガラスでできているため非常に折れやすく曲げ変形強度が極端に低いため、小さな曲率半径で曲げて引き出すことが困難である。このような制約のある光ファイバー引き出し線部を考慮して構造設計を試みると、ワッシャ型センサの厚さが 20mm 以上となる。このように軸力センサの直径に比べて厚さが大きくなると設置姿勢が不安定になり取り扱いが難しくなるため、できる限り厚さを小さくすることが望ましいものと考えられる。

このような光ファイバー独特の制約を考慮ながら検討した結果、ボルト軸方向から半径方向に 20 度だけ傾けた軸（以下、S軸という）上に光ファイバーFBG素子を埋め込んで設置することとした。この光ファイバーFBG素子の傾斜によって、軸力に対する光ファイバーFBG素子のひずみ感度が約 6% 低下することが見込まれるが、センサの厚さを約 10mm に抑えることが可能になり、設置姿勢の安定性と実用性の向上をはかることができた。

次に、ねじ締結時の座面圧分布については、締結力やこれに伴う弾性変形等によって変化することが知られている(賀勢, 1985)。また、通常市販され使用されているねじ座面をよく観察すると、必ずしも均質で平滑な仕上げが施されているとは言い難い場合があることがわかった。このためワッシャ型センサとボルトやナットの座面

の接触領域の圧力分布が不安定になり、これが原因で軸力センサ内部の光ファイバーFBG素子設置部位の局所的な応力やひずみがばらつくことが考えられる。これは軸力センサとして信頼性低下の原因である。

そこで、このセンサ特性とボルト座面接触半径によるセンサ特性への影響を検証するため、軸力が作用する荷重印加点の半径とワッシャ型センサのボルト軸力によって生じるボルト軸から 20 度傾斜した S 軸上の応力分布との関係を、有限要素法を用いた解析によって求めた。この計算では M10 ボルト用軸力センサを想定して、ワッシャ型センサの内径 11 mm、外径 31 mm、厚さ 10 mm とし、材質はステンレス鋼で縦弾性係数 $E = 193 \text{ GPa}$ 。ポアソン比 $\nu = 0.3$ とした。有限要素法を用いた解析は軸対称モデル解析とし、センサの半径方向断面において 2 次元軸対称解析を行った。解析ツールには汎用プログラムである ANSYS(ver.14)を用いた。

本解析時の境界条件は、センサ下面の半径 $r = 6.1 \sim 8.9 \text{ mm}$ の領域を軸方向に固定し、上面側に単位荷重 1 N を軸方向圧縮側に集中荷重を印加した。この荷重印加は、ボルト座面によって生じるワッシャ型センサ上面の圧力分布重心の半径方向のばらつきを想定しており、半径 $r = 6.1, 7.5, 8.9 \text{ mm}$ の 3 種類の円周への荷重印加について解析を行った。このときの単位軸荷重あたりの S 軸方向応力分布の計算結果を、図 3 に示した。この結果によると、S 軸上 $-2.0 \sim 2.0 \text{ mm}$ の領域における応力の平均値は 3.8 kPa/N であった。図のように、荷重印加点半径の変化による S 軸上の応力分布は比較的大きく変動するが、この応力変動幅は、S 軸上の $s = -2.0, 0, 2.0 \text{ mm}$ の位置においてそれぞれ、 $1.18, 0.29, 2.17 \text{ kPa/N}$ であった。平均応力 3.8 kPa/N と比較すると、この変動値は相対的にかなり大きい。この計算結果からボルト座面圧力分布のばらつきは FBG 素子にかかる応力分布に大きな変化をもたらす可能性があることがわかった。またこの計算結果のように、荷重印加点半径によって応力変動の傾向が大幅に異なり、応力の分布形状が変化することも光ファイバーFBG素子を使用する上で問題がある。これは、抵抗線ひずみゲージのようにゲージ長全体での平均のひずみを抵抗値の変化として出力する場合にはあまり問題にはならないものと考えられるが、一方、光ファイバーFBG素子の場合にはグレーティング長における不均一なひずみ分布がグレーティング内部における局所的な反射波長の不揃いをもたらし、これが光ファイバーFBG素子の反射光のスペクトル分布形状の歪みとなって現れる。このとき、軸力とスペクトルとの関係を求めることが困難になる場合があるためである。したがって測定精度と安定性の良いセンサとするには、座面の荷重印加点半径すなわちボルト座面接触半径を一定にして、軸力センサ内の応力分布を安定させる必要がある。

このためワッシャ型軸力センサの試作においては、図 4 に示したように、センサの上下面に円周状の突起部を設けて、ボルト座面との接触をこの突起部半径に固定し、軸力の印加半径を安定させた。このことによって、軸力センサ内部の応力分布の安定化を図ることが可能になった。

Fig.3 Analytical result of stress sensitivity distribution on s-axis. The stress of washer type sensor was analyzed. This plot shows the stress distribution on S-axis caused about with the axial force with radius r . It became clear that this stress distribution changes with radius r a lot.

Fig.4 Axial Force Sensor (3/4 cut-model). As shown in this figure, optical fiber FBG device tilted over and was embedded.

3・2 軸力センサの解析緒元

ボルト座面の接触半径の安定化のために円周状突起部を設けた軸力センサは、前節の解析モデルと同じく M10 のボルトを想定して、内径 11 mm、外径 31 mm、厚さ 10 mm とした。また、円周状突起部は直径 15 mm の位置に半径 1.4 mm の半円状断面で上下面に設けている。センサの材質はステンレス鋼を想定し、縦弾性係数 $E = 193$ GPa、ポアソン比 $\nu = 0.3$ とした。

有限要素法を用いた解析は軸対称モデル解析とし、半径方向断面において 2 次元解析を行った。また解析時の境界条件は軸力を受ける突起部のうち、下面突起部の最下端を軸方向に固定し、上面突起部の最上端に単位荷重 1 N を軸方向圧縮側に印加して計算した。このほかトルク荷重による影響を計算するために、この上面突起部に 1.0 Nm の単位モーメント荷重を印加して計算を行った。

この軸力解析モデルを図 5 に示した。

Fig.5 Finite element model and boundary conditions for axial force sensor using ANSYS.

Fig.6 Analytical result of FEM analysis: Vector plot of stress distribution. It was checked that it is the stress distribution almost parallel to the direction of an axis from this calculation result in the domain between the semicircle-like projection parts of an up-and-down side which apply axial force.

3・3 有限要素法を用いた解析結果

前節で設定した解析モデルと境界条件を用いて有限要素法を用いた解析を行った結果のうち、応力分布のベクトル線図を図6に示した。この図に示した計算結果によると、荷重のかかる上下面の半円状突起部の間の領域において、軸方向にほぼ平行な最大主応力分布になっていることがわかった。このとき図5において、光ファイバーFBG素子の設置を想定してボルト軸から20度だけ傾いた座標系S軸上の応力分布を図7に示した。それぞれ、図7a)は軸力荷重、図7b)はモーメント荷重によって生じる応力分布である。解析時に軸力荷重の場合1N、モーメント荷重の場合は1Nmのように単位荷重を印加していることから、同図の縦軸はS軸上応力の荷重あるいはトルク感度とみなすことができる。

この計算結果によると、まず軸力については、光ファイバー軸上の位置 $s = -2.0 \sim 2.0$ mm の領域において、比較的線形な変化傾向を示す応力分布を示しており、このことは光ファイバーFBG素子からの反射光スペクトル形状のひずみを小さくできるため好都合である。

次に、実際にグレーティング長4.0mmの光ファイバーFBG素子を $s = -2.0 \sim 2.0$ mm の領域に設置した場合を想定して、その波長の変化を検討する。この間の応力の軸力による感度の平均値は3.9 kPa/Nであり、光ファイバーの縦弾性係数が石英ガラスと同等の72 GPaであることを考慮すると、光ファイバーFBG素子のひずみのボルト軸力感度は $0.056 \times 10^{-6} \text{ N}^{-1}$ である。さらに式(3)を用いて、このひずみによる光ファイバーFBG素子の反射波長への軸力感度に換算すると、0.085 pm/Nの感度が得られた。一方、図7b)に示した応力のトルクによる感度は、同じ位置 $s = -2.0 \sim 2.0$ mm の領域において、0.097 kPa/Nmであり、光ファイバーFBG素子の波長変化 $\Delta\lambda$ に換算すると、 $6.3 \times 10^{-5} \text{ pm/Nm}$ となった。

今回計測対象として想定したM10ボルトにおける標準軸力は12250Nであり、このとき上述のセンサの波長変化は約 $1.0 \times 10^3 \text{ pm}$ となる。このことと、一般に光ファイバーFBGセンサの計測に用いられる計測器インテロゲータの波長計測精度が1pm以下であることを考慮すると約1/1000の分解能が得られる。このことから、ここで設計したワッシャ型軸力センサは十分な軸力感度を有することが期待される。また一方、このときのトルクについては、標準締付トルク24.5Nmにおける波長変化が $1.5 \times 10^{-3} \text{ pm}$ であり、光波長の変動は十分小さく、この影響は実用上問題にはならないものと考えられる。

a) Axial Force.

b) Torque

Fig.7 Analytical result of FEM analysis: This plot shows the stress distribution on S-axis generated by axial force or torque. The stress distribution which generated with axial force is linear distribution in general from domain $s=-2\text{mm}$ to $+2\text{mm}$. On the other hand, the stress distribution which generated by torque is a sufficiently small value.

4. 軸力センサ特性実験

4・1 試作した軸力センサと軸力特性実験方法

特性試験のために試作したボルト軸力センサを図 8 に示した。センサは SUS304 ステンレス製で、解析と同じく内径 11.0 mm、外径 31.0 mm、厚さ 10.0 mm の厚肉円筒型で、内外径部に 0.5 mm の面取りが施されている。また、光ファイバー取出し部には光ファイバーの折損を防止するために保護金具部を設けている。また、ここで使用した光ファイバー-FBG 素子は反射波長 λ_B が 1550 nm で、グレーティング長は 4.0 mm である。光ファイバー-FBG 素子は、軸力センサの内径側に軸と 20 度の角度で設けた幅 0.3 mm のスリット状溝内に、抵抗線ひずみゲージ用のエポキシ系接着剤（株）共和電業、EP-34B）で接着して固定した。

軸力によるセンサ特性試験では、図 9 に示したように、軸力センサの荷重を受ける円周状突起部に均一に荷重が掛かるように球状治具を用いた。荷重の印加には万能材料試験機（UH-F300,(株)島津製作所）を用い、ステップ状に荷重を調整して印加した。

またこのとき、光ファイバー-FBG 素子から得られる光スペクトルの計測には、図 10 に示した光計測回路を用いた。

光回路の構成には、広い波長帯域の光を得られる ASE 光源 (ASE-FL7002, FiberLabs Inc.), 波長分布を計測する光スペクトラムアナライザ (AQ6331, 安藤電機(株)) と光の進行方向を制御する光サーキュレータ (6015-3-FC, ThorLabs Inc.) を用いた. まず ASE 光源を發した光は光サーキュレータを通してボルト軸力センサに入射する. 試作した軸力センサに埋め込まれた光ファイバーFBG 素子によって特定の波長のスペクトルのみ反射され, 光ファイバー内を逆方向に戻ってくる. このとき, 光サーキュレータに戻った反射光は光スペクトラムアナライザに導かれ, これに入射する. この反射光は光スペクトラムアナライザを用いて解析され, スペクトル分布を観察・計測し, データ解析に用いた.

Fig.8 Axial force sensor using optical fiber FBG device for experiment.

Fig.9 Experimental arrangement for measurement of the properties on the axial force sensor.

ASE : Amplified Spontaneous Emission Light Source

OSA : Optical Spectrum Analyzer

Fig.10 Optical circuit of experiment system to measure the FBG spectrum.

Fig.11 Reflection spectrum from axial force sensor and change of spectrum in each step load.

Axial force increased from non-load to 50kN at 5kN step, and decreased after that. Change of the spectrum is plotted for each of this step. The spectrum changed to short wavelength with the increase in axial force, and returned with reduction.

Fig.12 Wavelength shift properties of axial force sensor depending on axial load.

Change of the light wavelength of the edge in light intensity -25dB of the spectrum by change of axial force is plotted. The light wavelength changed in proportion to axial force.

4・2 センサ特性実験の結果

光計測回路を含む実験装置を用いて、試作したワッシャ型ボルト軸力センサの特性計測実験を行った。

軸力センサに埋め込まれた FBG 素子の反射スペクトルを、図 11 に示した。FBG 素子の反射スペクトルは、Bragg 波長を中心に約 0.5 nm の帯域幅を有し概ね半波正弦波状の分布を示す。特性実験では無荷重から荷重を 5 kN ステップで載荷してゆき、50 kN になったのち最大 52 kN を印加して折り返し、逆にステップ除荷していった。このときの軸力センサの反射スペクトルの推移も同図に示した。このとき荷重載荷とともに軸力センサが圧縮され、反射スペクトルのピーク波長が 1550.1 nm から短波長側に推移し、1548.8 nm まで移動する。逆に除荷してゆくと長波長側に推移し、無負荷となったとき初期の反射スペクトルに戻った。この間、反射スペクトルはほぼ一定の半波正弦波状で推移しており、軸力センサ内部 S 軸上の応力分布形状がほぼ安定していることを確認できた。

次に、このときの軸力荷重印加による反射波長の推移を、図 12 に示した。これは図 11 の反射スペクトルにおいて、スペクトル両サイドで反射光量が -25 dBm となる波長端をプロットしたものである。図のように、軸力荷重と反射波長の変化には比例関係がみられる。光ファイバーFBG 素子の反射波長への軸力感度を k としたとき、この関係は次式、

$$\Delta\lambda = k \cdot F \quad (4)$$

として表されるが、実験結果から得られた軸力感度 k は、 $k = 0.0257\text{ pm/N}$ であった。この値は 3.2 節において有限要素法を用いた解析結果から推定した値 0.085 pm/N と比較すると 0.30 倍に低下している。

この原因は光ファイバーFBG 素子のワッシャ型センサ内への接着原因があるものと考えられる。まず、通常の抵抗線ひずみゲージの抵抗箔の断面積が約 $2\,500\text{ }\mu\text{m}^2$ であるのに比べて、光ファイバーFBG 素子の場合、石英ガラス部の直径が $125\text{ }\mu\text{m}$ で断面積が $12\,270\text{ }\mu\text{m}^2$ であり、抵抗線ひずみゲージの約 5 倍の断面積になりこれに伴って剛性が高くなっている。一方、直径 0.125 mm の円柱状の光ファイバーを幅 0.3 mm のスリットの内部に接着しているため、センサ金属面に面状に接着させることが困難であり、金属面が光ファイバーと線接触した周りに接着剤を充填した構造になる。このため接着層の平均実効厚さも光ファイバー直径の数分の一程度が見込まれ、センサ側のひずみを光ファイバーに接着層の弾性を通じて伝えることになる。更に光ファイバーFBG 素子のセンサ内への固定には抵抗線ひずみゲージ用のエポキシ系接着剤を使用した。この弾性係数は通常、金属やガラスなどと比べてかなり小さな値である。このことから、感度低下の原因は、光ファイバーFBG 素子の直径による高剛性と接着剤の弾性によるひずみ緩和が原因と考えられる。このことは通常の構造物表面のひずみ計測に接着剤で貼り付けた光ファイバーFBG 素子を用いたときに必ず生じる問題である。この感度低下は今後、例えば細径光ファイバー(水谷他, 2001)などを用いることなどによって軽減されるものと考えられる。

5. 結 語

ひずみ計測に光ファイバーFBG 素子を用いたワッシャ型ボルト軸力センサの研究を行った。本センサは、ひずみ検出と信号伝送に光ファイバーを用いているため、電磁ノイズへの耐性があり、しかも長距離信号伝送が可能というメリットがある。

センサの構造では、ボルト座面の圧力分布の不安定さによるセンサ出力特性のばらつきを防止するため、ボルト座面とセンサとの接触部に円周状の突起部を設けてボルト軸力の作用半径をこの突起部に固定することによって、ボルト軸力に比例して安定した応力分布と信号出力が得られるように工夫した。

センサの解析では、光ファイバーFBG 素子に作用する軸方向応力分布の特性を、有限要素法を用いた解析によって求めた。その結果、ボルト軸力に対して十分大きい信号が得られることがわかった。また、トルクの影響に関しては実用上無視できる感度であることがわかった。

センサ特性実験では、まず解析計算結果等に基づいて M10 ボルト用ワッシャ型ボルト軸力センサを試作した。このセンサの特性計測実験の結果、このボルト軸力センサでは、解析計算から推定した値の約 0.3 倍であったが軸力センサとして必要な軸力感度が得られるとともに、軸力に比例して光ファイバーFBG 素子の反射波長がほぼ線形にシフトする良好な特性が得られた。

今後さらに、軸力センサとして実用化のために、信頼性や計測精度の向上や検証などを行ってゆく予定である。

最後に、本研究を遂行する上で多大なご支援をいただいた伸興電線株式会社の尾崎雅宣工場長と志賀俊也部長をはじめとする社員各位に感謝の意を表します。さらに、特性実験の実施には、香川高等専門学校技術教育支援センターの大賀祐介氏と丸笹憲志氏にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

文 献

賀勢晋司, ねじ締結における座面圧について, 精密工学会誌 Vol. 51, No.5 (1985), pp.997-999.

水谷忠均, 岡部洋三, 武田展雄, 細径FBGセンサによるクラック検出手法のCFRP 議事等方性積層板への応用, 日本機械学会第9回機械材料・材料加工技術講演会論文集(2001), p.114.

Rybczynski, W., ねじとねじ回しこの千年で最高の発明をめぐる物語, 早川書房 (2003).

山本晃, 賀勢晋司, 軸直角振動によるねじのゆるみに関する研究, 精密機械 Vol.43, No.4 (1977), pp.470-475.

References

Kasei, S., Bearing Surface Pressure on Bolted Joint, Journal of Japan Society for Precision Engineering, Vol. 51, No. 5 (1985), pp. 997-999 (in Japanese).

Mizutani, T., Okabe, Y. and Takeda, N., Application of Crack Detection by Small-Diameter FBG Sensors to CFRP Quasi-Isotropic Laminates, Proceeding of the 9th Materials and Processing Conference(M&P2001), p.114 (in Japanese).

Rybczynski, W., ONE GOOD TURN: A Natural History of the Screwdriver and the Screw, HAYAKAWA Shobo (2003) (in Japanese).

Yamamoto, A. and Kasei, S., Investigations on the Self-loosening of Threaded Fasteners under Transverse Vibration-A Solution for Self-loosening Mechanism- , Journal of Japan Society for Precision Engineering, Vol.43, No.4(1977), pp.470-475 (in Japanese).