

# 光ファイバを用いた高空間分解能分布センシングに関する研究

## Study on Fiber-Optic Distributed Sensing Technique with High Spatial Resolution

東京大学工学系研究科 村山 英晶 Hideaki MURAYAMA  
株式会社レーザック 町島 祐一 Yuichi MACHIJIMA Member  
宇宙航空研究開発機構 井川 寛隆 Hirotaka IGAWA  
株式会社フジクラ 大道 浩児 Koji OMICHI

We have developed a newly sensing technique by which we can measure strain or temperature along an optical fiber with the high spatial resolution of less than 1 mm. This fiber-optic distributed sensing technique is based on optical frequency domain reflectometry and it can map strain or temperature profiles along fiber Bragg grating. In this paper, the principle of this technique, distributed strain sensing with the high spatial resolution and the applications to strain measurements of welded joints are described.

**Keywords:** Fiber-Optic Sensor, Distributed Sensing, Strain, Temperature, Fiber Bragg Grating, Optical Frequency Domain Reflectometry, Welded Joint

### 1. 緒言

光ファイバによる通信技術の発達は目覚ましく、現在では通信システムの基幹を担い、また FTTH (Fiber To The Home) に代表されるように各家庭までのアクセス回線にもその技術が活用されている。

一方で、光ファイバはセンサとしても利用可能であり、従来の電気センサにはない様々な優位性、特徴を持っている[1]。特に、細径・軽量、耐久性・耐食性、耐電磁ノイズ・耐電圧性、遠隔・分布計測と言った特徴が航空機や船舶、橋梁、プラントを代表とする大型構造物のモニタリングや地盤・都市・鉄道路線などの広域モニタリングを可能とする技術として注目される理由である。ここで、分布計測とは1本の光ファイバに沿って任意位置に多数の計測点を持たせる技術であり、遠隔計測技術と合わせて広範囲で効率的な計測が可能となる。

本論文では、状態基準保全 (CBM) と同様の目的を持つ構造ヘルスマニタリング (Structural Health Monitoring) およびその分野における光ファイバセンサの開発状況を述べたのち、著者らが開発を進めている高空間分解能分布計測技術の原理と応用について述べる。本技術により、空間分解能は約 0.6 mm に達し、また溶接継手のひずみ分布モニタリングへの適用では、局所的なひずみ分布の変動を捉えることに成功した。

連絡先:村山英晶、〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1、東京大学工学系研究科システム創成学専攻、電話: 03-5814-6514、e-mail: murayama@sys.t.u-tokyo.ac.jp

### 2. ヘルスモニタリングと光ファイバセンサ

1980年代末に現在の光ファイバセンサの主流となっている分布計測技術に関する重要な発明[2]・発見[3]がなされ、ほぼ同時に構造物のセンサによる常時監視技術の必要性が認識され始めた[4]。構造物のセンサによる常時監視技術は、現在構造ヘルスマニタリングと呼ばれ、当初は航空機の信頼性向上を実現する技術として注目されたが、まもなく船舶や土木・建築構造など構造物全般にその概念が普及した。1990年代初頭から本格的に開始された光ファイバセンサに関する多くの研究が、構造ヘルスマニタリングへの適用を主要な目的としていたと言ってよいだろう。

構造ヘルスマニタリングが航空機の分野から発達した背景・契機として、1988年に起きたアロハ航空 243便の事故がしばしば取り上げられる。機体前方から主翼近くまでの天井が吹き飛ぶという致命的な破壊を受け、死者1名・重軽傷者多数を出しながらも無事帰還したことで有名である。この事故は、飛行回数、すなわち離着陸が極端に多い経年機体において、疲労により複数のき裂損傷が同時進行的に進展し、それが一気に結合して破壊に至ったとされている[5]。また、整備士は見つけることができなかったが、事故飛行の直前にき裂に気付いていた乗客もいた。航空機の分野では信頼性設計技術として損傷許容設計が発展してきたが、このように設計時に考慮されていない厳しい運用条件、経年劣化、マルチサイト損傷、整備・点検作業

の不備といったことを原因とする事故の経験によって、従来の設計・保守管理技術の限界が認識され、新しい技術の概念を発達させる契機となった。

構造ヘルスマニタリングでは、人間の神経網のように構造物に一体化・ネットワーク化されたセンサによって常時監視することで、初期の損傷や経年劣化をいち早く検知し、適切な保守管理を促すことで構造健全性を確保する。このような、生物が持つ、いわゆる自己診断性を持たせることは、構造物を知能化（スマート化）することであるので、知的構造（Smart Structures）とも呼ばれる[6]。構造ヘルスマニタリングは構造物の状態基準保全の一手法と考えてもよいが、生物や人間を手本として、状態監視のための自動化されたシステム（センサとプロセッサ）を構造物自身に装備させて自己診断性機能により適切な運用と保守管理を促すものであり、常時またはオンデマンド監視を基本としている。そのため、一般的な状態基準保全の効能に加えて、異常事態、例えば地震直後の健全性の把握など緊急時への迅速な対応も可能であり、またモニタリング結果を利用して構造物に大きなストレスを生じさせない運用支援もできる。さらに、製造中からヘルスマニタリングシステムを実装することで、工程管理・品質保証も実施すれば、“ゆりかごから墓場まで”構造物の面倒を見ることができる。

生物のような自己診断性を構造物に持たせ真の知的構造を実現することは、相当に賢いロボットを作るのに等しく難しい問題で、そのためには大きく分けて次の2つの課題がある。

- (1) 高精度・高密度なセンサネットワークの開発
- (2) センサ情報のリスクへの翻訳・可視化

自己診断性を構造物に付与するには、生物の神経網に匹敵する高精度かつ高密度なセンシングシステムが必要となることは容易に想像できる。細径・軽量であり、可とう性もある光ファイバは、構造物中に生物の神経網のように張り巡らせることができ、分布計測技術により痛みを感知する、すなわち損傷を検知するセンサネットワークを効率的に実現させることが可能となる。特に分布計測技術の発展は著しく、アメリカズカップ艇に利用していたブリルアン散乱光を利用した光ファイバによる分布計測技術である Brillouin Optical Time Domain Reflectometry (BOTDR)では1 m だった空

間分解能は Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR)手法により 1 mm 以下となり[7][8]、数分かかった計測時間も大幅に短縮されている[9]。温度やひずみセンサとしての精度に関しても、従来の高精度な電気センサと同等のレベルに達している。ここで空間分解能とは、ひずみや温度など計測量を識別可能な2点間の最小距離であり、例えば 1 mm の空間分解能の分布型光ファイバひずみセンサが 10 m の計測範囲を持っているとすれば、10,000 個のゲージ長 1 mm の抵抗線ひずみゲージを並べたのと同様以上の情報が得られることになる。き裂・損傷による局所的な応力集中[10]やガス・液体の漏洩によるわずかな温度変化などを検知することが可能となっている。

全長約 25 m の先進複合材料で製造されたアメリカズカップ艇のハルに設置した BOTDR を用いた光ファイバセンサによって実測された船体長手方向のひずみ分布を解析結果、計測条件とともに Fig. 2 に示す[7]。グラフの横軸は距離を示し、光ファイバセンサで連続的なひずみ分布を計測し、その結果が解析とよく一致していることが分かる。しかし、空間分解能が 1 m であるという制限から、基本的にはそれ以上の範囲のひずみ分布に影響を与える損傷の検知しかできない。

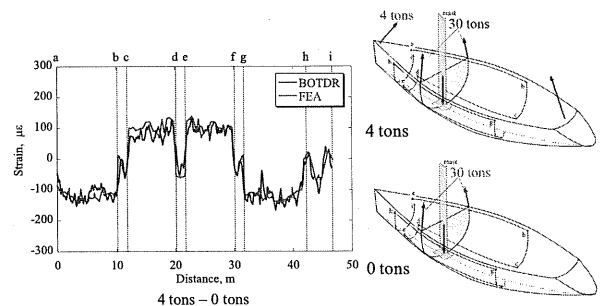
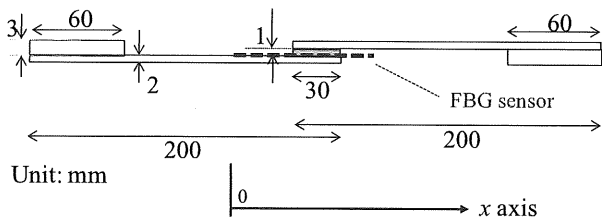


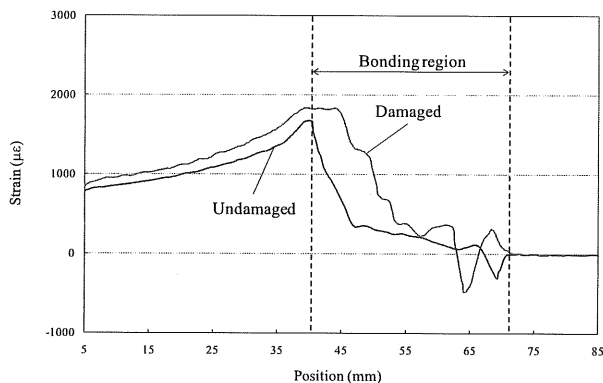
Fig. 1 Strain distributions of an IACC yacht measured by a fiber-optic sensor and calculated by FEM.

著者らが開発した空間分解能が 1 mm 以下の分布型センサを用いれば、破壊に至る前の構造物中に生じる小さな欠陥・損傷を検知することができる。ここでは、複合材料構造などでよく用いられるシングルラップ継手を対象にし、接着層の中に光ファイバを埋め込み、内部の長手方向ひずみ分布を計測した例を Fig. 2 に示す[11]。グラフの結果は試験片に引張荷重を付加した際の損傷あり、なしでのひずみ分布である。1,000 倍以上に向上した空間分解能により、また埋め込み可能という光ファイバの特徴を活かして、接着層内部の損傷も

検知できるようになった。また、このような計測結果は損傷検知のみならず、設計や製造にフィードバックすることが可能である。



(a) single-lap joint with an embedded fiber-optic sensor.



(b) Strain distributions in undamaged and damaged bonded joints.

Fig. 2 Application of distributed sensing with the high spatial resolution to strain measurements of a bonded joint.

また、2つ目の課題として挙げたセンサ情報のリスクへの翻訳・可視化は、言わば医師の診断、見立てであり、上述したようにセンシング技術が発達した現在、構造ヘルスマモニタリングの分野では多くの努力が診断技術に注がれている[12]。高速化・省エネ化や快適性といった利用者にとって分かりやすい指標に対する投資に対して、安全性への合理的な投資が難しいのは、「安全」が利用者にとっては、あって当然のものであり、かつ「安全性」を定量的に感じる事が難しいことが原因であろう[13]。したがって、定量化されたリスクを分かりやすく示すことが、リスク低減に寄与する技術の開発と普及に求められている。リスクを求めるために必要な外的環境要因であるハザードと、抵抗側であるシステムの脆弱性は、構造信頼性の観点から言えば、それらは荷重と強度である。設計段階で共に不確かさをもつ荷重と強度を確率変数として信頼度が求められるが、センサにより構造健全性を評価することは、確率変数としての強度や剛性の変動を常時把握すること

であり、外力を計測・推定することは荷重の変動を把握することとなり、それらを考慮することで運用時のリスクを定量化することが可能となる。ただし、基本的には強度や荷重は直接計測できるものではなく、ひずみ、応力、振動といった構造応答から間接的に求められるものであるため、リスクの定量化には材料・構造に対するより深い理解が求められている。

例えば、Fig. 2 に示したひずみ分布から接着層のはく離長さを同定し[11]、残存強度を推定するには、破壊力学的な解析から可能になる。また、光ファイバセンサによって計測されるひずみ分布情報から航空機の翼構造に作用する分布荷重を逆解析により推定し、損傷許容に基づいた保守管理に利用しようとする試みがある[14]。最新の高性能センシング技術とこれまで培われた力学解析技術とを融合することで、より高度なリスクの定量化が可能になると考える。

### 3. 高空間分解能分布センシング

#### 3.1 Fiber Bragg Grating (FBG)

FBG は、紫外線により光ファイバのコア中に回折格子を形成し、通信分野では光フィルタとしての機能を持たせた光ファイバ型デバイスとして用いられている。回折格子を光ファイバ中に非破壊的に直接形成できるため、低損失・小型・高信頼性・伝送用光ファイバとの整合性など、多くの利点を有している。Fig. 3 に示すように、グレーティングの周期を $\Lambda$ 、光ファイバの屈折率を $n$ とすると、次の式を満たす波長（ブラッグ波長） $\lambda_B$ で強い反射が生じ、その他の波長では透過する。

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

一般的に長距離通信あるいはセンサ用途では  $1.55 \mu\text{m}$  波長帯域の光源を用いることが多いが、屈折率  $n=1.45$  程度であるから、 $\lambda_B=1.55 \mu\text{m}$  とするためには、 $\Lambda=0.53 \mu\text{m}$  程度になる。

式(1)のブラッグ波長 $\lambda_B$ は、屈折率 $n$ あるいはグレーティングの周期 $\Lambda$ の変化によってシフトする。つまり、グレーティングの存在する部分にひずみあるいは温度変化が与えられると、 $n$ および $\Lambda$ が変化し、ブラッグ波長 $\lambda_B$ がシフトすることになる。この仕組みによって、FBGをひずみと温度のセンサとして利用することができる。一般的には光源には広帯域の波長を出力できる光源を用い、FBGからの反射光波長のシフト量を計測

する。これをひずみや温度に換算することが可能であるが、センサ内の平均的な値となる。一般的にはFBGのゲージ長は10 mm程度である。温度補償ができれば絶対的なひずみ計測が可能となり、クリープ変形など経時的な変化も定量評価できる。

### 3.2 OFDRによるFBG反射光計測

FBG上に発生するひずみ・温度分布を計測するため、OFDRによってFBGから反射される光を計測する。まず、OFDRを用いたひずみ分布計測法に用いられる光学系の概念図をFig. 3に示す。光学系は、波長可変型光源(Tunable Laser)、受光器(Detector)、全反射終端(R)、FBGセンサ(FBG)からなる。全反射終端とFBGセンサは干渉計を構成している。波長可変光源で可干渉性の高い光の波長を連続的に変化させ、各波長における反射光強度を受光器で計測する。

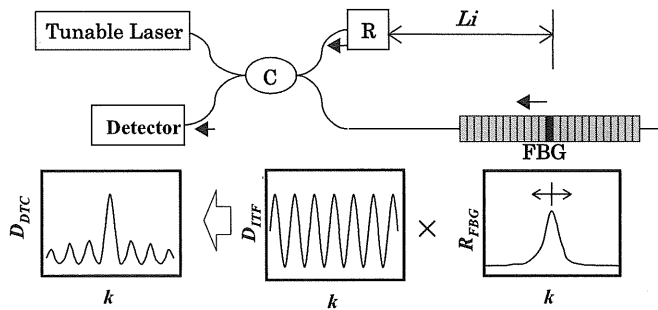


Fig. 3 Measurement system with OFDR.

FBG上の微小区間からの反射光は、ある波長の光のみを強く反射するため、波長可変光源の光波数 $k$ とその反射光強度の関係は、Fig. 3の下段右のような形となる。また、ピークを示す光波数 $k$ は、FBG部でのひずみの大きさに依存して変化する。ここで、光波数 $k$ と波長 $\lambda$ は以下の関係を有する。

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2)$$

なお、本論文の定式化においては主に光波数を、計測・解析結果の表示には主に光波長を用いて記述している。一方、FBG微小区間からの反射光と全反射終端Rからの反射光は光路差 $2nL_i$ を有し、これら2つの反射光は干渉を起こす。この干渉光強度の直流成分を除いた変動成分は、光波数 $k$ に依存して余弦関数的に変化し、以下のように表される。

$$\tilde{D}_{ITF} = A \cos(2nL_i k) \quad (3)$$

ここで、 $n$ は光ファイバの屈折率を表す。前述した二つの作用により、受光器で検出される光強度は、Fig. 3の下段左に示すように、光波数 $k$ に対してある周期とピークを持った形で変化する。つまり、次式のような形で表される。

$$\tilde{D}_{DCT} = R_{FBG}(k) \cos(2nL_i k) \quad (4)$$

ここで、 $R_{FBG}(k)$ はFBG内微小区間の反射特性を表す光波数(波長)の関数である。この受光器で検出される信号の周期から行路差 $L_i$ つまりFBG内微小区間の位置を、ピークを示す光波数 $k$ からひずみの値を計測することが可能となる。ここまで全反射終端Rからの光路距離が $L_i$ のFBG内微小区間の反射光について述べてきた。FBG全体としては、光路差 $L_i$ つまり周期が異なる式(4)で表される波形の和として光強度が観測される。

### 3.3 データ解析手法

上で述べたように、光源の波長(光波数)を掃引したとき受光器で観測される信号は、光路差つまりFBGの位置によって決定される周波数が異なる信号の重ね合わせである。この信号に対して、STFT(Short Time Fourier Transform)を応用したデータ解析を行い、簡便にFBG内の各位置でのスペクトルを求めることができる。まず、ある光波長に着目して、それを中心として適切なウィンドウを施して信号データを抜き出す。抜き出した信号に対してFFT解析すると、信号内に含まれる各周波数成分の強度が得られる。これは、着目した光波長におけるFBG内各位置での反射強度に対応する。着目した光波長を横軸の一点にとり、FFT解析の周波数、すなわち光路距離を縦軸にとり、さらにFFT解析で得られる各周波数の強度を色調で表現する。全ての波長帯域に対してウィンドウを移動させつつ同様のFFT解析を行うと、横軸が光波長、縦軸が光路距離を表し、さらに色調が強度を表すスペクトログラムが得られる。このスペクトログラムは、各光波長に対する、FBG内任意位置での反射強度を示すこととなる。

Fig. 4にOFDRによって計測されたFBGの反射光に対する信号とデータ解析後に得られたスペクトログラムを示す。横軸は波長(nm)である。ここでは、4.95 mから5.05 mに位置するゲージ長が100 mmのFBGを用いている。スペクトログラムからFBG内の各位置に対応する波長スペクトルを抜き出し、その中心波長、すなわちブラッグ波長を半値幅の中心として求めること

ができる。このブラッグ波長の分布がすなわちひずみ分布、または温度分布を表すことになる。

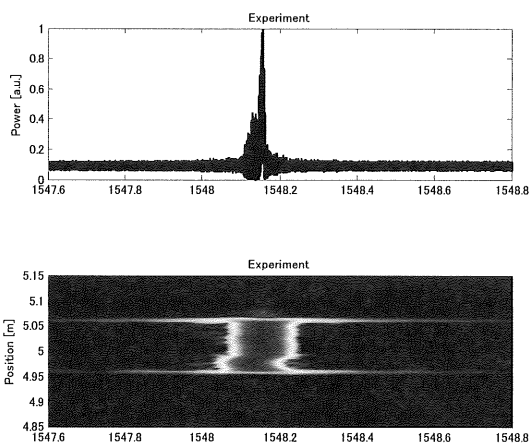


Fig. 4 Signal obtained from a detector (upper) and spectrogram by using FFT with sliding windows (lower).

### 3.4 応力集中部のひずみ分布計測

FBGを用いた分布型光ファイバセンサによって、有孔引張試験片の円孔周りに発生する応力集中部位のひずみ分布を計測した例を示す。

試験片は直径 2 mm の円孔を 2 つ、直径 4 mm の円孔を 1 つ持ち、それらは一方の端を揃えて直線状に並んでいる (Fig. 5)。ゲージ長 100 mm の FBG を円孔の端から 0.5 mm 離れた位置に直線状に接着した。ただし、FBG の一方の端 20 mm 分だけは温度補償のため接着せずに、応力フリーの状態にある。

Fig. 6 には、試験片に引張荷重 3 kN を付加したときに受光器で観測された信号とスペクトログラムを示す。信号からは、いくつかの波長にピークを持つスペクトルが重なり合っている様子が分かる。またスペクトログラムからは、ブラッグ波長が、手前にある応力フリー部の波長から、接着部では高波長側に移動しており、3 つの位置、すなわち円孔付近でさらに高波長側にシフトしている様子が分かる。100 mm ゲージ長の FBG の円孔付近を含む 50 mm のスペクトルから求めたブラッグ波長から算出したひずみ分布と有限要素解析によって求めたひずみ分布を Fig. 7 に示す。実測値が解析値よりも多少小さな値を示しているが良い一致を示していると言える。なお、実測値は FBG に沿って約 1 mm 毎に得られ、約 0.6 mm の空間分解能で計測されたひずみ分布と一致している。すなわち 1 mm 以下のひずみゲージを 100 点程度隙間なく並べて計測したことに等

しく、既存の単点計測センサでは実現が困難な計測を可能にする分布計測技術であると言える。

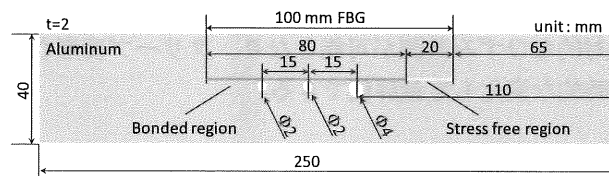


Fig. 5 Specimen with holes and FBG sensor.

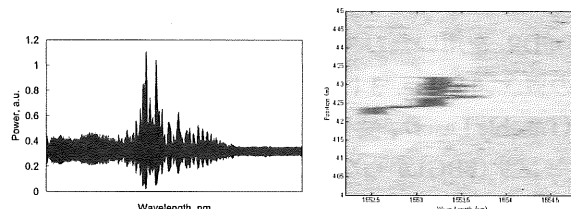


Fig. 6 Detector's signal and spectrogram.

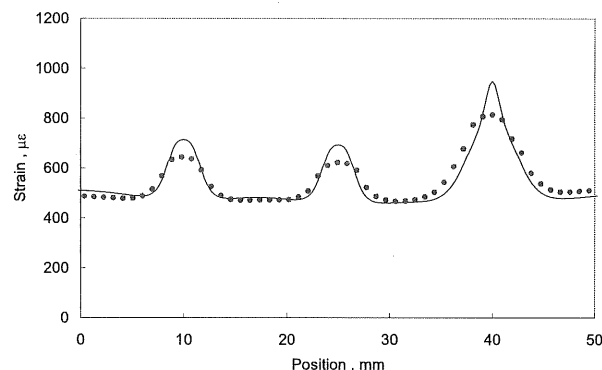


Fig. 7 Strain distribution adjacent to the holes.

## 4. 溶接継手のひずみモニタリング

OFDR を用いた高空間分解能ひずみセンシング技術を溶接継手部のひずみモニタリングに適用した。試験片とセンサ位置を Fig. 8 に示す。試験片は厚さ 1.6 mm の炭素鋼のパイプで、中央部で突き合わせ溶接されている。ゲージ長 100 mm の FBG を溶接線に下側に沿って接着した。また、AE 計測用にレーザック社製の FOD センサを試験片上部と下部に接着した。試験片に引張荷重を 0.5 t までと 3.0 t まで負荷したときのひずみ分布をそれぞれ Fig. 9 と Fig. 10 に示す。Fig. 9 では、点線で囲った位置以外では荷重に比例してひずみが増減しているが、点線の位置でひずみが局所的に変動し、また除荷後もひずみが残留しているのが分かる。これらの位置では、3 t まで荷重を上げる間に AE を伴って、Fig. 10 に示すようにさらにひずみが増加し、残留ひず

みも大きくなった。X線撮影により、これらの異常が見られた位置の一部に、欠陥があることが確認された。

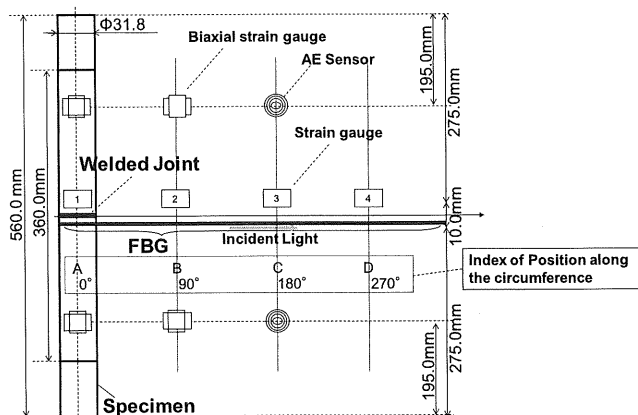


Fig. 8 Dimension of the specimen and sensor locations.

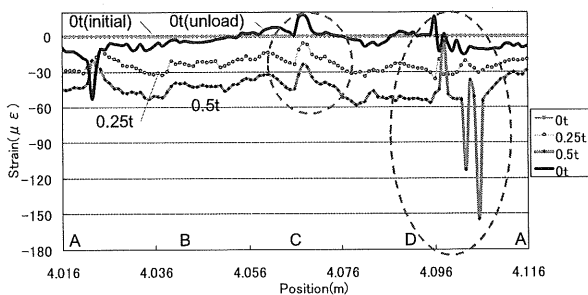


Fig. 9 Strain distributions under the load case of 0.5 t.

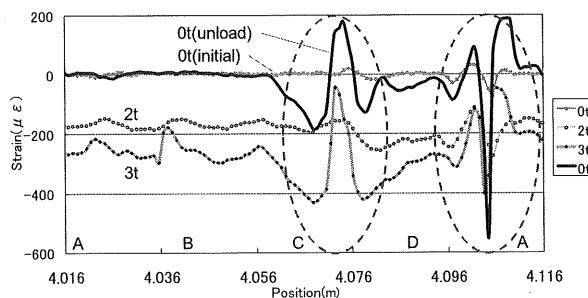


Fig. 10 Strain distributions under the load case of 3.0 t.

## 5. 結言

- 1) 1 mm 以下の高い空間分解能でひずみ分布を計測する光ファイバセンサを開発した。
- 2) 有孔引張試験片の応力集中部のひずみ分布を正確に計測できることを確認した。
- 3) 欠陥に関わると思われる溶接継手部のひずみ分布の変動を捉えることができた。

## 参考文献

- [1] E. Udd, "Fiber Optic Smart Structures", Wiley-Interscience, 1995.
- [2] G. Meltz et al., "Formation of Gragg grating in optical fibers by a transverse holographic method," *Opt. Lett.*, Vol. 14, No. 15, 1989, pp. 823-825.
- [3] T. Horiguchi et al., "Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fiber," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, Vol. 1., No. 5, 1989, pp. 107-108.
- [4] M. V. Gandhi and B. S. Thompson, "Smart Materials and Structures," CHAPMAN & HALL, 1992, pp.122-129.
- [5] 寺田博之, 小林英男, アロハ航空機の胴体天井吹き飛び, 失敗データベース-失敗百選
- [6] A. V. Srinivason and D. M. McFarland, "Smart Structures," Cambridge University Press, 2001, p2.
- [7] H. Murayama et al., "Application of fiber-optic distributed sensors to health monitoring for full-scale composite structures," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 14, No. 1, 2003, pp. 3-13.
- [8] H. Murayama et al., "Distributed strain measurement of welded tubular joint with long gauge FBG," *Proc. of SPIE*, Vol. 7004, 2008, 700452-1-700452-4.
- [9] K. Hotate and Z. He, "Fiber optic nerve systems for smart materials and smart structures -Recent progress in Brillouin Optical Correlation Domain Analysis System-," *Proc. of International Symposium on Secure-Life Electronics*, 2008, pp. 47-58.
- [10] H. Murayama et al., "Strain measurements in bonding layer by an embedded fiber-optic distributed sensor with the high spatial resolution," 13th US-Japan Conference on Composite Materials, 2008.
- [11] 小原康平, "分布型光ファイバセンサを用いた接着継手のひずみモニタリング", 東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻 修士論文, 2009.
- [12] 村山英晶, 鷗沢潔, "ヘルスマニタリング", 強化プラスチック, Vol. 55, No. 4, 2009, pp. 136-141.
- [13] 藤野陽三, "社会基盤の災害事故防止に向けたメンテナンスとセンシング技術の活用", 第20回鉄道総研講演会, 2007.
- [14] 秋山学朗, "ひずみ・変位センサ情報を用いた分布荷重推定手法に関する研究", 東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻 修士論文, 2009.

