

光ファイバセンサは多種にわたるが、干渉計型センサ、損失変化型センサ、分布型センサ、多点型センサに大別することができる¹⁾。ひずみ(変位)あるいは損傷検出モニタへの適用を想定した場合、ホモダイン干渉計型センサとしてファブリー・ペロー干渉計型センサ²⁾、ヘテロダイン干渉計型センサとして、前報で開発した光ファイバレーザドップラー速度計(LDV光ファイバセンサ)³⁾、損失変化型ファイバセンサとしては、単純な光の透過損失の計測⁴⁾以外に、マイクロバンドセンサ⁵⁾、ループセンサ⁶⁾等がある。分布型センサとしてはOTDR(Optical Time-Domain Reflectometer)³⁾、BOTDR(Brillouin Optical Time-Domain Reflectometer)⁷⁾およびPOTDR(Polarization Optical Time-Domain Reflectometer)⁸⁾などがあり、多点型センサではブラグ格子センサ⁹⁾が代表的である。また、単純な透過損失や長ゲージ長センサは、ある領域の(平均値的)状態を知ることを目的としているので、ここでは領域型センサと呼ぶことにする。本報では、光ファイバセンサを、測定点が有限数であるか、ある領域全体を一つの測定点と考えるか、あるいは領域に無数の測定点が分布しているかという、測定点数と測定領域の種類により、多点型、領域型および分布型に分類することにした。

前報では、損傷位置の検出を目的としたOTDRと長ゲージ長センサとしてのLDV光ファイバセンサを対象に、複合材料船体構造への埋め込みを想定したセンサ技術に関する基礎研究を行った。本報では大型鋼船への適用性を考慮するため、光ファイバを鋼構造へ貼付けて使用する場合を想定したセンサ技術に関する基礎研究を行なった。センサの種類としては、LDV光ファイバセンサ(領域型センサ)、ブラグ格子センサ(多点型センサ)、BOTDR(分布型センサ)を取り上げ、小型引張り試験片および長スパン曲げ試験片を用いた測定実験を行い、各センサの有用性、適用限界等に関する基礎的知見を得るための研究を行った。なお、LDV光ファイバセンサは、ゲージ長の制約がない、温度の影響を受けにくい、動的特性に優れる等の長所を有するため、船体はりとしての曲げ変形や船首等における波浪衝撃の計測、ブラグ格子センサは、高精度の多点型センサとして主要構造部位におけるひずみ測定、BOTDRは船体に光ファイバネットワークを張り巡らすことによるひずみ分布測定等の適用を想定している。

2. 測定原理と計測システム

2.1 レーザドップラー(LDV)光ファイバセンサ

被測定物の変形し、それに伴って光ファイバの測定部の長さ(ゲージ長さ L)が時間とともに変化し、端部Aの反射面が速度 $v(=dL/dt)$ で端部Bの基準面に対して変位する場合(Fig.1参照)、基準面におけるレーザー光の周波数 f_B と端部Aで反射した反射光の周波数 f_A の差を $f=f_A-f_B$ とすると、 f がレーザー光の波長 λ と速度 v より次式

で与えられる。

$$f=2v/\lambda \quad (4.2.5.1)$$

周波数のシフト f を測定すれば、上式から測定部における変位速度 v が求められる。このドップラー効果を利用した、非接触型の速度計あるいは振動計は既に実用化されている。また、レーザ光の導光路に光ファイバを用い、先端に取り付けたレンズにより被測定物表面にレーザ光を照射し、それからの反射光をレンズにて集光する方式のレーザ振動計も開発されている。本報で新たに開発したLDV光ファイバセンサは、光ファイバ自身の伸縮を計測する点で、従来の方式と測定目的が異なっている。なお、LoとSirkisは¹⁰⁾、同様の考え方による計測システムを、前報⁴⁾とほぼ同時期に著者らと独立に開発している。

前報⁴⁾では、OMETRON社製レーザ速度計のビーム光をファイバカップラにより集光し、GI型マルチモード光ファイバに導いて、センサを構成していたが、本報では、小野測器製レーザドップラー振動計LV1100を改造し、光ファイバへの集光部と速度計測部を一体舞台上に構成し、振動対策と安定性の改善を試みた。また、受光部分の光ファイバに、偏波保持型光ファイバを用いることにより、干渉性を高めている。

Fig.1に模式的に示すように、レーザー光源から発生した周波数 f_0 のレーザー光は、ハーフミラーによって直進する光線と図では下へ90°折れ曲がる光線に分岐される、直進した光線は、ハーフミラーを透過し、集光器を介して光ファイバの導光部に導かれる。導光部はフリーな状態にありこの部分での伸び縮みは無視している。導光部を伝播したレーザー光は試験片に固着された測定部の端面で反射する。ドップラー効果により $\pm f_D$ だけ周波数が変化した光は、導光部を逆の経路を通して集光器に至り、ハーフミラー等を介して、干渉計へ導かれる。一方、レーザー光源からハーフミラーで90°折れ曲がったレーザー光は、音響光学変調器(AOM)により、 f_M だけ周波数がシフトして干渉計へ導かれる。このようにして光ファイバの測定部端面で反射した周波数が $f_0 \pm f_D$ のレーザー光と、AOMにより周波数が $f_0 + f_M$ に変調したレーザー光が重ね合わされると、周波数が $f_M \pm f_D$ のうなりを生じるから、そのうなり成分の周

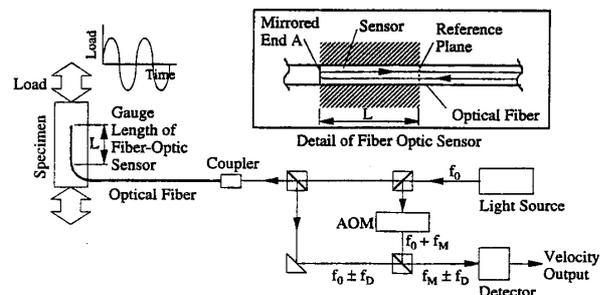


Fig.1 Schematic figure of fiber-optic LDV measurement

波数を計測することにより、符号を含めてドップラーシフト $\pm f_D$ を測定することができる。

試作した計測システムの周波数範囲は1 Hz~1.5 MHz、変位速度測定範囲は $3\mu\text{m/s}$ ~5 m/s、ハイパスフィルタ (OFF, 100 Hz, 1 kHz 可変) とローパスフィルタ (10 kHz, 100 kHz, OFF 可変) を有している。チャンネル数は1である。試作システムでは船首波浪衝撃など比較的周波数の高い現象のモニタリングを想定して、周波数範囲を高め設定した。レーザドップラー速度計は原理的にはDC信号から計測可能であり、フィルタの設定を変更すること等により、0.1~10 Hz 程度の変形計測にも適用は可能である。

2.2 ブラッグ格子センサ

ブラッグ格子センサでは格子パターンを横から露光することにより、光ファイバの物理的特性を長さ方向に変化させ、ピッチ長が Λ の周期的な格子をコア部に焼き付けてある。このブラッグ格子センサにある波長帯域をもつレーザ光を入射させると、 $\lambda=2n\Lambda$ (n はファイバの有効屈折率) の波長を持つ光が強く反射する。ひずみあるいは温度変化により、 Λ が $\Delta\Lambda$ だけ伸展すると、波長は $\Delta\lambda=2n\Delta\Lambda$ だけシフトすることになる。この波長 (周波数) シフトを測定することによりひずみが計測できる。

本報では、工業技術院物質工学工業技術研究所所有のエレクトロフォニックス社製 FLS 3000 を実験に用いた。センサ形状を Fig. 2 に示す。本報で用いたブラッグ格子センサのゲージ長は 6.25 mm である。FLS 3000 と光ファイバの接続は標準 FC-PC コネクタによって行う。温度補償には IC 温度センサ用の BNC 端子が設けられている。ひずみと温度の入力端子数は、標準でそれぞれ 4 チャンネルである。本装置のひずみ測定範囲は $\pm 1\%$ 、分解能は 10^{-6} ($1\mu\epsilon$) 以下、周波数範囲は 5 kHz 以下、安定度/ドリフトは $\pm 3\mu\epsilon$ 以下である。

2.3 BOTDR

ブリルアン散乱は、光が物質中に生じた音波と相互作用し、周波数がずれて散乱される現象である。この周波数 ν_B

はブリルアン周波数シフトと呼ばれている。この ν_B は光ファイバの長さ方向のひずみ ϵ に大きく依存する。石英系シングルモード光ファイバの無ひずみ状態における ν_B は 12.68 GHz であるが、ひずみと ν_B の関係の係数は 581 MHz/% である。ここで、 ν_B を 1 MHz の精度で測定可能であるとすれば、光ファイバのひずみを $20\mu\epsilon$ の感度で検出できる。しかし、光ファイバ中で発生するブリルアン散乱エネルギーは非常に微弱であり、また周波数も高いので、 ν_B を直接測定するためには高度な光電力変換技術が必要となる。パルス光によって生じた散乱光を時間領域で分析することにより、ひずみの位置が求められる。つまり、光ファイバ全長におけるひずみ分布を計測できる。位置の分解能は光源のパルス幅によって異なる。

本研究で用いた BOTDR (安藤電気製 AQ 8602) は、NTT 電送システム研究所で開発されたものを安藤電気 (株) が製品化したものである。本報では、安藤電気 (株) のご厚意により計測実験に供した。本装置は、コヒーレントな連続光をプローブ光と参照光に分波し、光周波数変換回路により ν_B に等しい周波数シフトを有するプローブパルス光を得るもので、光ファイバ中でブリルアン散乱されたパルス光はヘテロダイン受光器で検出される。レーザ光の入射と検出は同じ一端から行っている。本報で用いた BOTDR のひずみ測定範囲は 3%、ひずみ測定精度は $\pm 100\mu\epsilon$ 、距離分解能は最高 2 m である。センサは光ファイバ自体であり、FC コネクタにより計測器に接続される。

3. レーザドップラー (LDV) 光ファイバセンサによるひずみ計測実験

3.1 試験片

Fig. 3 に示すような引張試験片を用いた。材質は一般用構造用鋼である。掴み部の幅 40 mm、平行部の幅 20 mm で、ゲージ長さは 200 mm、板厚は 3 mm である。この試験片ゲージ部中央付近の表面に、光ファイバと箔ひずみゲージを同じ側になるように貼り付けた。箔ひずみゲージ (ゲージ長 5 mm) の貼り付けには、通常のゲージセメントを用いた。光ファイバの取り付けは、以下の方法によった。

3.2 光ファイバの前処理と取り付け

LDV 光ファイバセンサ計測では、基準光と反射光の間干渉を利用するという観点から光ファイバを選択すると、偏波保持型の光ファイバが好ましい。しかし、この型の光フ

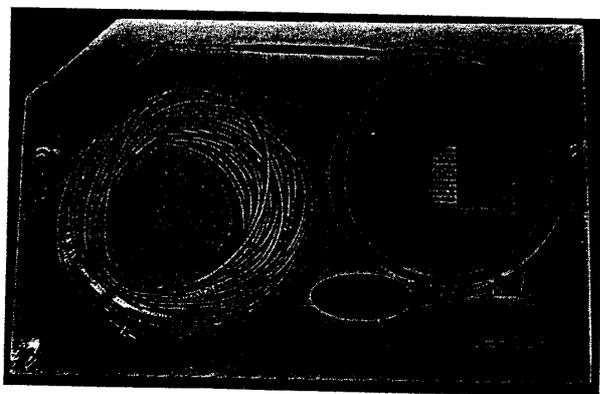


Fig. 2 Bragg grating fiber sensor

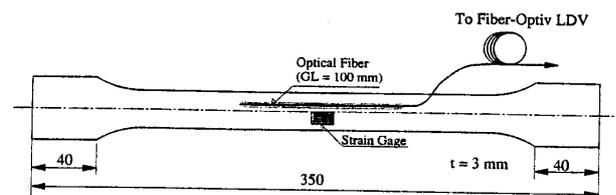


Fig. 3 Tensile specimen

ファイバは高価であり、また光ファイバの接続において互いの偏波面同士を合わせてやる必要があり、他のシングルモードファイバと較べて、接続が難しい。そこで、本報では、偏波保持型ファイバに加えて、シングルモード光ファイバをセンサおよび導光路として使用した。ただし、偏波保持型光ファイバ以外の光ファイバを使用する場合でも、計測器への入力には偏波保持型光ファイバとし、偏波保持型光ファイバにシングルモードファイバを継ぎ足すことにより各種光ファイバを適用した。光ファイバ同士の接続は、まず、エリクソン社製超音波ファイバ切断器 (EFC 11) を用いて端面を切断し、アセトン等で端面を洗浄した後、3M 製ロックスプライス (2525) あるいは FC ベアファイバコネクタによりファイバ同士を接合した。

LDV 光ファイバセンサではセンサは光ファイバの端面となるから、端面で反射率を上げる工夫が大切である。本研究では、エリクソン社製超音波ファイバ切断器で端面を正確に直角に切断した後、洗浄した端面に銀鏡反応により鏡面を形成させている。

光ファイバのゲージ部については、樹脂コーティング層を被覆させたままの状態 (直径 $\phi 250\mu\text{m}$) とコーティングを剥いでクラッドをむき出しにした状態 (直径 $\phi 125\mu\text{m}$) の 2 通りを比較した。耐久性の観点からはコーティングしたままが好ましいが、ひずみ計測の観点からはコーティングはない方が好ましいと考えられる。そこで、コーティング層を着けたものと剥いだものの両方を用意した。光ファイバの試験片への取り付けは、試験片表面をサンディングした後洗浄し、瞬間接着剤により直接試験片表面へ光ファイバを貼り付けた。LDV 光ファイバセンサでは試験片に貼り付けた部分がゲージ長さとなる。本研究では、光ファイバセンサのゲージ長は 100 mm とした。ただし、直接被測定物へ光ファイバを接着する場合、接着長さは接着剤の流れ等によりばらつきやすい。

3.3 実験方法

引張試験片を油圧チャックを介して疲労試験機 (島津製作所サーボバルサ、容量 5 トン) に取り付け、応力比 $R=0.1$ の片振り正弦波荷重を加えた。正弦波荷重の最大値は、弾性率を 206 GPa としたときのゲージ部の公称ひずみが 0.01 % から 0.1 % まで、0.01 % きざみで変化させた。周波数は 10, 20, 30 Hz の 3 通りとした。

試験片の本数は、偏波保持型ファイバではコーティング層のあるものと取り除いたもの、またシングルモードファイバでは、本体側の偏波保持型光ファイバとの接続に、ロックスプライスとベアファイバコネクタを用いたもの各 1 本ずつを用いた。シングルモードファイバでは、コーティング層は付けたままとした。

各計測器からの電圧出力は A/D 変換され、コンピュータの外部記憶装置に収録された。データ収録および解析には LabVIEW を用いた。LDV 光ファイバセンサからの信

号はひずみ速度信号であるから、時間積分によりひずみに変換した。

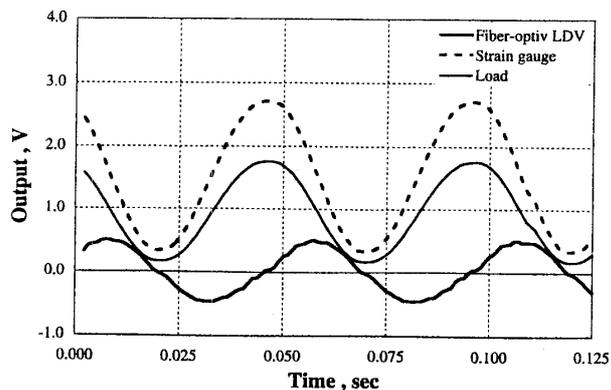
3.4 実験結果

荷重計出力、光ファイバセンサ出力、箔ひずみゲージの出力の時間変化を、偏波保持型光ファイバでコーティング層付きの場合、同型光ファイバでコーティング層を剥いだ場合、シングルモードファイバとロックスプライスの組み合わせ、シングルモードファイバとベアファイバコネクタの組み合わせの 4 通り全てについて、荷重周波数 20 Hz、最大公称ひずみ 0.05 % の場合について、Figs. 4~7 に示す。周波数、荷重振幅が異なる他の試験についても同様な結果が得られた。各図において、(a) 各センサからの電圧出力結果、(b) 荷重、LDV 光ファイバセンサおよび箔ひずみゲージの信号を、ゲージ長さ 100 mm の変位に変換した結果の比較、(c) LDV 光ファイバセンサと箔ひずみゲージの出力の関係、(d) ゲージ長さ 100 mm の変位に換算した LDV 光ファイバセンサと箔ひずみゲージの関係を示す。

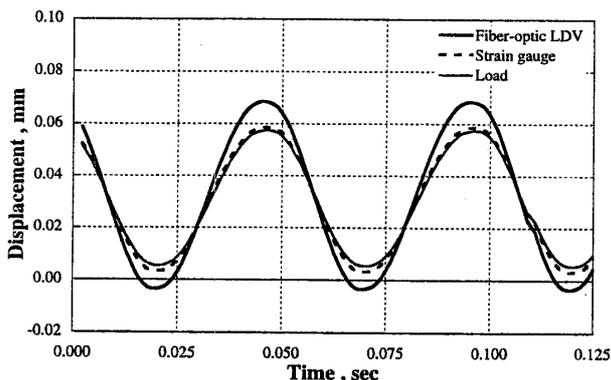
データの基本となる (a) 各センサ出力の時間変化については、荷重と箔ひずみゲージの結果は同位相であるが、LDV 光ファイバセンサはひずみ速度のため、 90° 位相がずれている。偏波保持型光ファイバでは、コーティングのあるなしによる波形の顕著な差は見られなかった。シングルモードファイバでも、ロックスプライスを用いて接合した場合は、偏波保持光ファイバより優れたノイズの少ない信号が得られた。しかし、ベアファイバコネクタを用いた場合は、ノイズレベルがかなり高くなった。

LDV 光ファイバセンサの信号を時間積分し、変位で比較した、(b) 換算変位の時間変化では、荷重、LDV 光ファイバセンサ、箔ひずみゲージともほぼ同等の信号が得られた。また、(c) LDV 光ファイバセンサと箔ひずみゲージの出力関係では、理想的には x, y 座標に長短軸が一致した楕円となるはずであるが、多少形がいびつになり、軸も傾いているので、位相ずれやノイズの影響が見られる。特にベアファイバコネクタの場合は、信号のばらつきが大きく問題があることがわかった。(d) LDV 光ファイバセンサと箔ひずみゲージの換算変位同士の関係については、わずかに位相ずれがあるものの、ほぼ線形関係が成立することがわかった。ヒステリシスはコーティング無しの方が小さい。

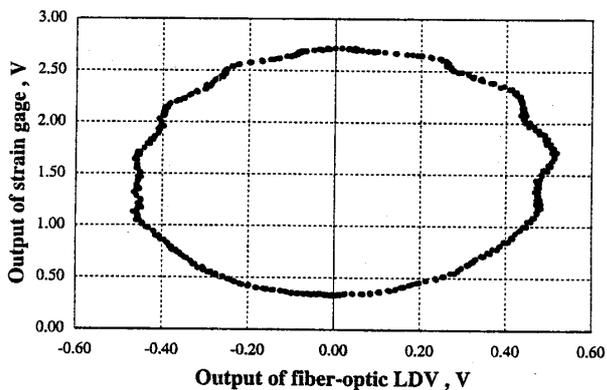
正弦波負荷におけるひずみゲージ出力範囲と LDV 光ファイバセンサ出力範囲の関係を Fig. 8 に示す。ただし同じひずみ振幅でも、荷重の周波数 f が異なるとひずみ速度は変わるので、LDV 光ファイバセンサの出力は $2\pi f$ で正規化してある。両出力について良い直線関係があり、さらに周波数による差はほとんどないことがわかる。図中の記号の NC はコーティング層を無し、C はコーティング層有り、PM は偏波保持型光ファイバ、RS-SM はロックスプライスでシングルモードファイバを接いだもの、また数字は荷重周波数を表す。



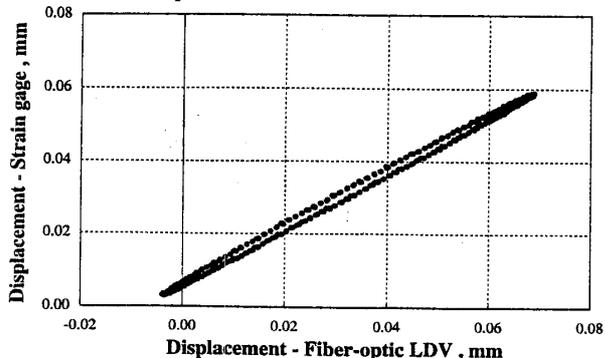
(a) Time history of output (Load, strain gauge and fiber-optic LDV)



(b) Time history of strains converted

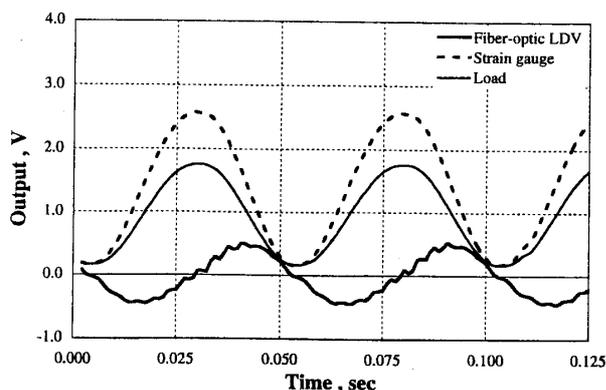


(c) Relation between strain gauge and fiber-optic LDV outputs

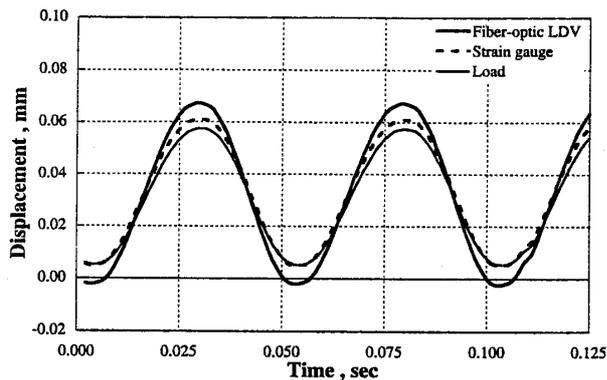


(d) Relation between strain gauge output and converted strain from fiber-optic LDV data

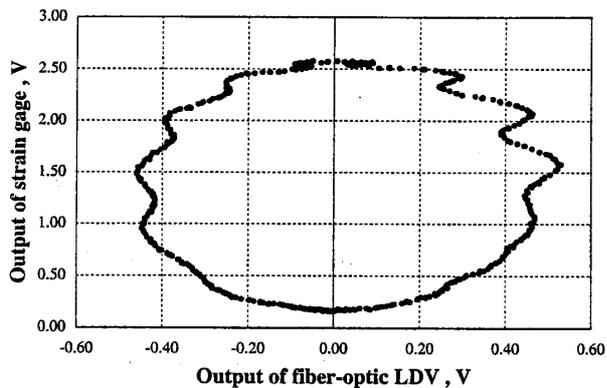
Fig. 4 Test result of the fiber-optic LDV measurement (PANDA fiber with coating)



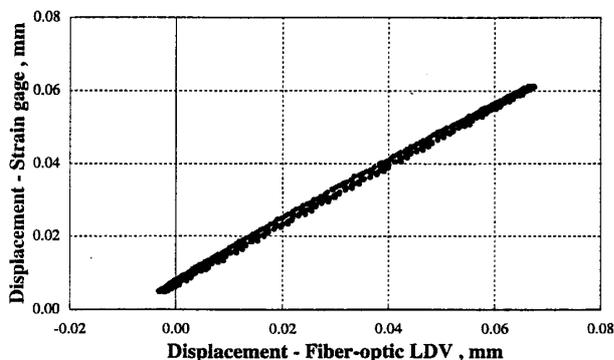
(a) Time history of output (Load, strain gauge and fiber-optic LDV)



(b) Time history of strains converted

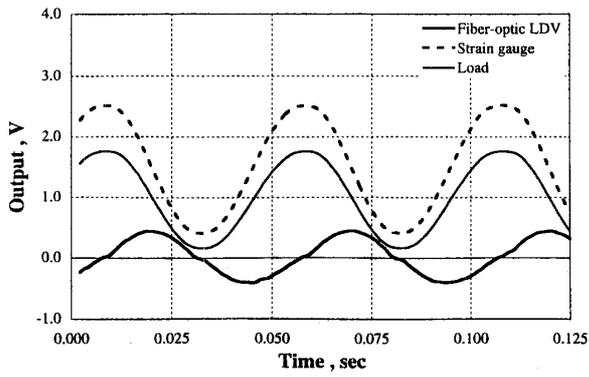


(c) Relation between strain gauge and fiber-optic LDV outputs

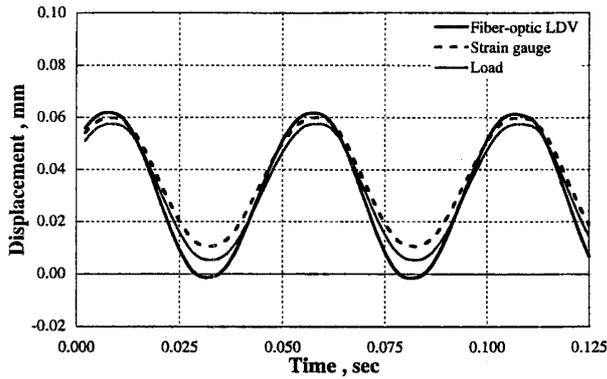


(d) Relation between strain gauge output and converted strain from fiber-optic LDV data

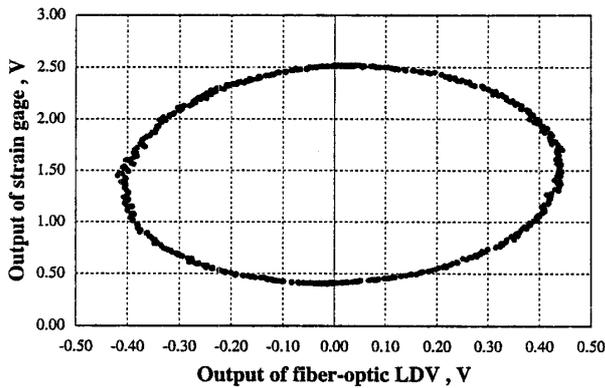
Fig. 5 Test result of the fiber-optic LDV measurement (PANDA fiber without coating)



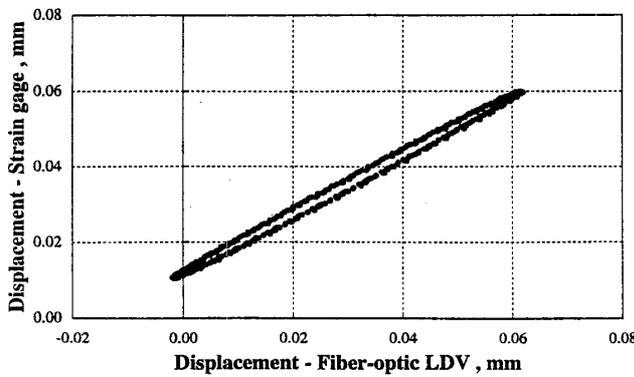
(a) Time history of output (Load, strain gauge and fiber-optic LDV)



(b) Time history of strains converted

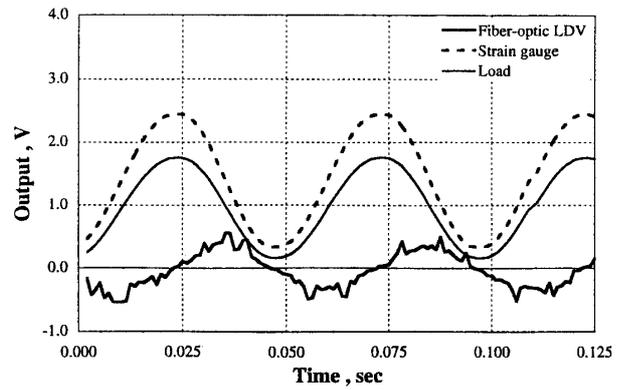


(c) Relation between strain gauge and fiber-optic LDV outputs

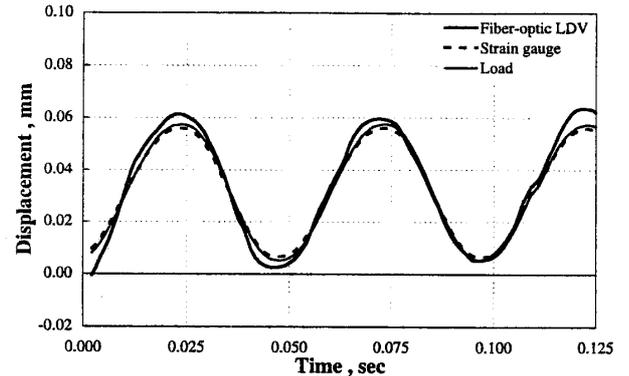


(d) Relation between strain gauge output and converted strain from fiber-optic LDV data

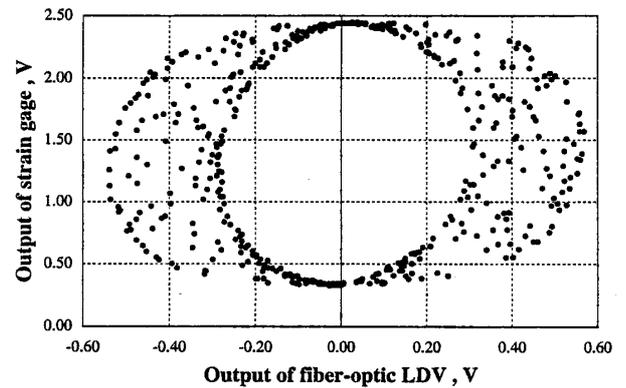
Fig. 6 Test result of the fiber-optic LDV measurement (single mode fiber connected with lock splice)



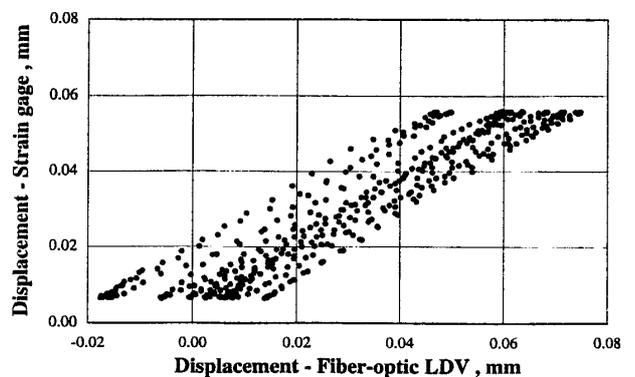
(a) Time history of output (Load, strain gauge and fiber-optic LDV)



(b) Time history of strains converted



(c) Relation between strain gauge and fiber-optic LDV outputs



(d) Relation between strain gauge output and converted strain from fiber-optic LDV data

Fig. 7 Test result of the fiber-optic LDV measurement (single mode fiber connected with bare fiber connector)

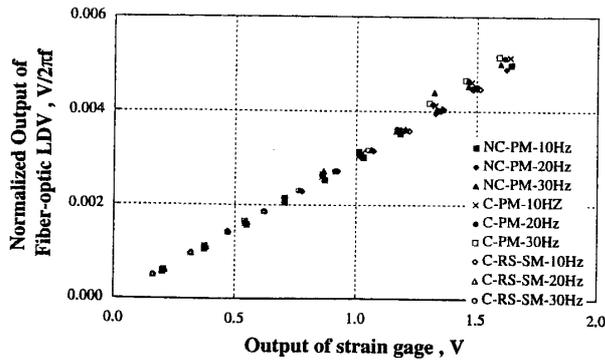


Fig. 8 Relation of amplitudes between strain gauge and fiber-optic LDV

4. ブラグ格子センサによるひずみ計測実験

4.1 試験片

試験片は Fig. 3 と同様の試験片を用い、箔ひずみゲージ (ゲージ長 5 mm) とゲージ長 6.3 mm のブラグ格子センサを瞬間接着剤にて貼り付けた。

4.2 実験方法

試験片を機械式掴み具を介して材料試験機 (インストロン社製, 容量 10 ton) に取り付け, ストローク速度 0.5 mm/min にて引張荷重を荷重した。無荷状態から 10 kN まで単調に荷重した後, 2.5 kN まで除荷し, さらに 20 kN まで荷重して無荷状態まで除荷した。その間の荷重, 箔ひずみゲージとブラグ格子センサの各出力をコンピュータにより計測した。

4.3 実験結果

定常状態におけるブラグ格子センサの測定値をインジケータのデジタル表示によりモニタした。測定中は数 μe の変動を示しただけで, 極めて安定した測定値を示した。荷重の測定値は, 断面積と弾性率 206 GPa を用いて公称ひずみに換算した。このようにして荷重から換算したひずみ,

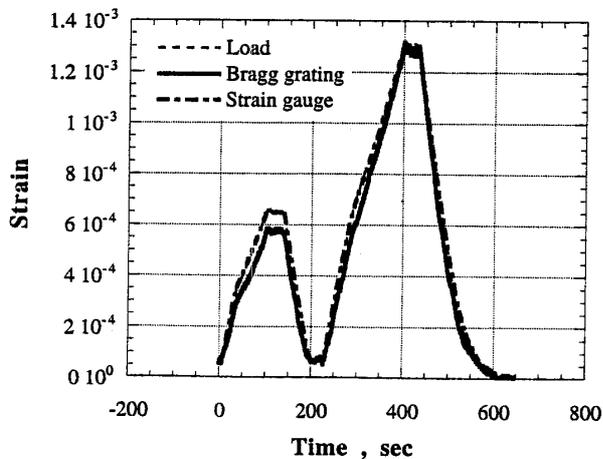


Fig. 9 Test results of load, strain gauge and Bragg grating sensor outputs

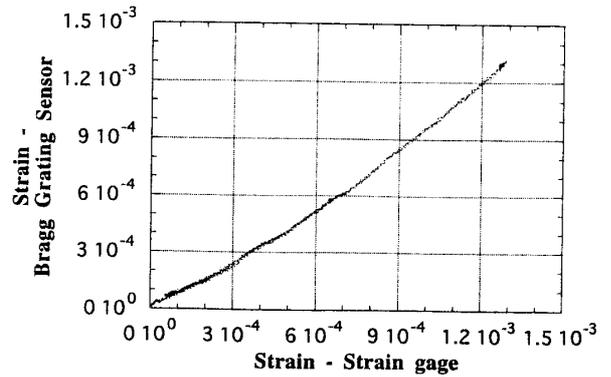


Fig. 10 Relation between strains measured with strain gauge and Bragg grating sensor

ブラグ格子センサによるひずみ, 箔ひずみゲージによるひずみの時間変化を Fig. 9 に示す。荷重換算ひずみと箔ひずみゲージの測定値はほぼ一致し, ブラグ格子センサの値がわずかに小さい値を示した。箔ひずみゲージとブラグ格子センサの測定結果を比較して Fig. 10 に示す。両者の関係にはわずかであるが非線形性が認められた。ただし, 除荷と再荷重でヒステリシスを描くようなことはなく, 試験片内のひずみ分布など実験上の問題であった可能性がある。

5. BOTDR によるひずみ計測実験

5.1 試験体

試験片には, 一辺 25 mm で肉厚が 2.5 mm の中空矩形断面で全長 4 m のアルミニウム製はりを用い, Fig. 11 に示すように, 支点間距離 3.5 m で試験片中央に重錘により三点曲げ荷重を負荷した。光ファイバを支点間 3 m の範囲に貼り付けた。最初の実験では, 1 本の試験片を用い, 3 m の範囲における光ファイバのひずみ分布を計測した。次に, 2 本の試験片を用い, 光ファイバを 3 m の範囲で, 交互に合計 7 本貼り付けた。後者の場合, 試験片間の光ファイバの長さ約 30 mm \times 6 を加え, 総計 21.2 m の光ファイバの領域にひずみが作用することになる。試験片と BOTDR 装置との間には約 80 m の距離を置いている。

5.2 実験方法

支点間中央の位置で試験片に重錘により, 三点曲げ荷重

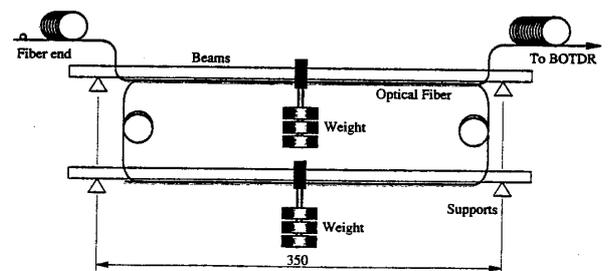


Fig. 11 Three point bend specimens used for BOTDR measurement

を荷重し、そのままの状態に保持したまま、BOTDRによるひずみ計測を行った。重錘の質量は、荷重用金具を含めて、103 N、200 N、300 Nである。この荷重値は、試験片中央での最大曲げひずみがそれぞれ、0.046%、0.091%、0.135%に相当する。1回の計測には約5分を要する。これは、ブリルアン散乱のピークを検出するため、周波数領域でスキャンするからである。ブリルアン散乱の周波数シフトの計測結果はひずみに換算され、装置のディスプレイ上に、距離の関数として表示される。

5.3 実験結果

Fig. 12(a), (b)に計測結果の一例を示す。グラフの横軸は計測器から測った測定位置(距離)、縦軸はブリルアン散乱の周波数シフトから計測したひずみである。縦軸と横軸の1目盛はそれぞれ、0.1%と20mである。またハッチングをした領域は光ファイバ先端より外側の計測領域外であることを示す。(a)1本の試験片に300Nの曲げ荷重を負荷した場合は、明らかに曲げひずみによるピークが計測された。ただし、本装置の距離分解能は1m以上なので、測定領域が3mであることを考えると、曲げひずみ分布が計測されたわけではない。試験片貼付部に相当する光ファイバ位置(図中①と②の間)のBOTDRで計測されたひずみ変化は0.115%となった。この値は、曲げひずみの最大値0.135%(荷重30.5kgf相当)より小さいが、平均値0.07%より高い値となっており、妥当な計測値であると考えられる。

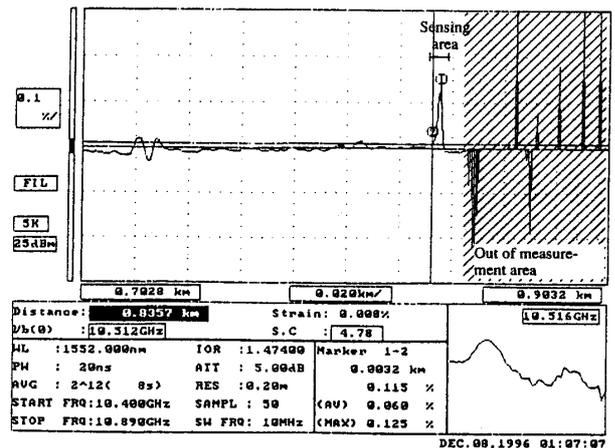
Fig. 12(b)に、2本の試験片を用いて、光ファイバの測定領域を21.2mにした場合の計測結果を示す。測定領域内において、高ひずみが計測されている。ひずみ分布を詳細に眺めると、7つのピークが観察され、21.2mの領域内に7つのひずみのピークがある実験条件に良く対応した結果となっている。図中①と②で示した評点間のひずみ変化は0.122%となり、曲げひずみの最大値0.091%(荷重200N相当)より高い値を示した。

6. 結 言

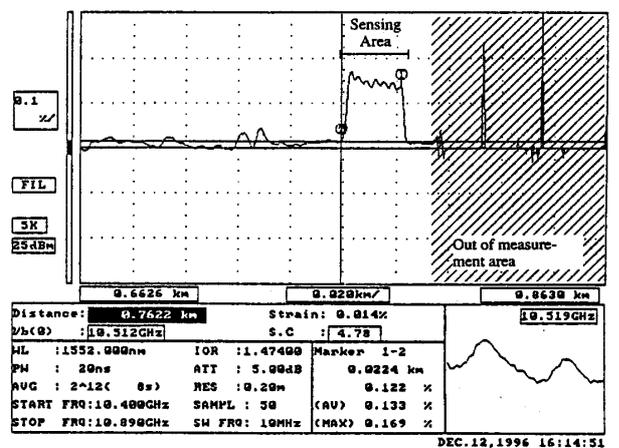
(1)LDV光ファイバセンサ

レーザドップラー効果を利用して光ファイバの伸縮速度(変位速度)を計測する装置を開発し、その性能を評価するための基礎的実験を行った。干渉計からある長さまでを偏波保持型光ファイバとし、その先をシングルモードファイバと接合する方法を試みた。光ファイバの端面を銀鏡とすることで強い反射光が得られるため、光ファイバの接合部で多少の損失があっても十分な強度の反射光が得られた。接合する光ファイバ同士の端面を正しく切断し、接合部の損失を低く押さえられる結合方式(本研究ではロックスプライス)を用いれば、シングルモードファイバを計測部とした方が、偏波保持型ファイバを用いるよりノイズの少ない安定した変位速度信号が得られた。

光ファイバセンサとしてはコーティングを剥いでクラッ



(a) Single specimen with 3 m optical fiber bonded



(b) Two specimens with 21.2 m optical fiber bonded

Fig. 12 Test results of BOTDR: Horizontal and vertical axes of the diagram indicate location and strain, respectively. Digits of the horizontal and vertical axes are 20 m and 0.1%, respectively. Location means the distance from the indicator.

ドをむき出しにする方が、ひずみ速度をより敏感に検出できると考えるが、耐久性の観点からはコーティング層を付けたままの方が好ましい。そこでコーティングの有無が計測結果に及ぼす影響を比較したところ、30 Hz程度までであれば、コーティングの有無による顕著な差は見られないという知見を得た。

(2)プラグ格子センサ

プラグ格子センサの出力は非常に安定しており、数 μE の変動を検出可能であり、船体モニタリング用センサとして将来有望であると考えられる。本報では1本の試験片について実験したのみであり、耐久性評価、センサ貼付技術、温度補償などを今後の課題としたい。実船への適用を通してこれらの課題を検討していきたいと考えている。

(3)BOTDR

測定領域 3 m でも、ひずみのピークを満足できる精度で計測できた、さらに測定領域を大きくした場合 (21.2 m) その領域内でのひずみの変動に対応する測定結果を得ることができた。この方式は貼り付けた光ファイバ全長がひずみセンサとなるため、大型建造物のひずみ分布を光ファイバネットワークによって計測できる利点がある。ただし、1 回の測定時間がかかりかかるため、動的に変動する荷重を計測することは、現在の測定技術では難しい。

(4) 船体構造モニタリングへの適用可能性

LDV 光ファイバセンサは、理論上ゲージ長に制限がない、ゆっくりとした温度変化の影響を受けにくいなどの利点を有する反面、低周波数域のひずみの感度が低くなる、ひずみ速度からひずみへの変換には時間域での積分が必要など、船体構造モニタリングへの適用に際しての制約がある。船首部の波浪衝撃計測、小型舟艇のひずみ測定など比較的高周波数領域での構造応答のモニタリングへの適用が考えられる。プラグ格子センサは、価格が高価であるのが欠点であるが、従来の箔ひずみゲージの代替として、長寿命、防爆性、耐食性、多点計測での利点等を生かした適用が期待できる。BOTDR は分布型センサとして船体構造全体のひずみ計測を可能とするが、測定に時間がかかるのが欠点であり、その船体構造モニタリングへの適用事例は制限されると思われる。

謝辞

本研究の一部は、平成 8 年度日本造船研究協会第 233 部会「船舶の高度モニタリングの基礎研究」(部会長：伏見彬，東京大学教授) として行ったものである。また、機器、センサの使用に際して、安藤電気(株)および(株)オプトサイエンスには格別のご配慮をいただいた。

参 考 文 献

- 1) 武田, スマート化のためのセンサ材料・技術, 日本複合材料学会誌, Vol. 22, No. 6 (1996), pp 203.
- 2) S. J. Petuchowski, T. G. Giallorenzi and S. K. Sheem, A Sensitive Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer, IEEE J. Quantum Electron, QE-17 (1981), pp. 2168.
- 3) 影山, 金原, 鈴木, 大澤, 島村, スマートストラクチャ概念の船体構造への適用に関する基礎研究(第 1 報, 光ファイバによる変位と損傷の検出方法の検討), 日本造船学会論文集, Vol. 178 (1995), pp. 583.
- 4) B. Hofer, Fiber Optic Damage Detection in Composite Structures, Composite, Vol. 18, No. 4 (1987), pp. 309.
- 5) J. N. Field and J. H. Cole, Fiber Microbend Acoustic Sensor, Appl. Opt., Vol. 19, No. 9 (1980), pp. 3265.
- 6) 高橋, 野村, 津田, 剣持, 林, 福田, ループ型光ファイバセンサの基礎特性, 日本機械学会第 74 期通常総会講演会講演論文集(1), No. 97-1 (1997), pp. 596.
- 7) 倉嶋, 堀口, 立田, プリルアン散乱を応用した分布型ファイバセンサ, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J-74-c-II, No. 5 (1991), pp. 467.
- 8) A. Rogers, Polarization Optical Time Domain Reflectometry, Electron. Lett. Vol. 16 (1980), pp. 489.
- 9) D. H. Simonsen, R. Paetsch and J. R. Dunphy, Fiber Bragg Grating Sensor Demonstration in Glass-Fiber Reinforced Polyester Composites, Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., No. 1777 (1992), pp. 73.
- 10) S. Lo and J. S. Sirkis, Strain-Rate Sensor Based on In-Fiber Doppler Velocimetry, Proc. 1995 SEM Spring Conf., Grand Rapids, MI (1995), pp. 646.