

Fiber Bragg Gratings センサーを利用した壁面せん断応力計の開発

拾井 隆道*, 川北 千春*

Development of Wall Shear Stress Sensor Using Fiber Bragg Gratings

by

HIROI Takamichi* and KAWAKITA Chiharu

Abstract

Wall shear stress sensors capable of large-scale multi-point measurement and measurement under magnetoresistance effect are needed to investigate the drag reduction phenomena caused by bubbles. In this study, we developed a wall shear stress sensor using fiber bragg gratings (FBG) for the sensor (FBG-SSS). FBGs are attached to the cantilever in the streamwise and spanwise directions of the direct method wall shear stress sensor to measure wall shear stress in two directions. Temperature compensation and high sensitivity were attained by attaching FBGs to both sides of the cantilever in each direction. We evaluate the characteristic under static and dynamic loading by comparing them with those of a conventional wall shear stress sensor that uses semiconductor strain gauges (SCSG-SSS). In static load tests, the non-linearity and hysteresis of the FBG-SSS were less than 1 % of the rated output, similar to those of the SCSG-SSS. The measurement of frictional resistance in single-phase flow and bubbly flow, which corresponds to dynamic loading, was the same for both the FBG-SSS and SCSG-SSS. Furthermore, a spectral analysis of the FBG-SSS measurements revealed that the fluctuation in wall shear stress in the streamwise direction increased below 20 [Hz] in a bubbly flow.

* 流体設計系

原稿受付 令和4年4月22日

審査日 令和4年6月6日

目 次

| | |
|------------------------------|----|
| 1. 緒言 | 28 |
| 2. 実験手法 | 29 |
| 2.1 せん断応力計 | 29 |
| 2.1.1 FBG せん断応力計 | 29 |
| 2.1.2 半導体ひずみゲージ式せん断応力計 | 31 |
| 2.2 静的荷重試験方法 | 32 |
| 2.3 流体中での試験方法 | 33 |
| 3. 計測結果 | 34 |
| 3.1 静的荷重試験 | 34 |
| 3.2 流体中での評価結果 | 35 |
| 3.2.1 時間平均値 | 35 |
| 3.2.2 非定常成分 | 37 |
| 4. 結言 | 40 |
| 謝辞 | 40 |
| References | 41 |

1. 緒 言

国際海運における温室効果ガス (Greenhouse Gas, GHG) の削減のために、2018 年に国際海事機関 (International Maritime Organization, IMO) において GHG 削減戦略¹⁾が採択された。これは、国際海運からの GHG 排出総量を 2050 年までに 2008 年比で 50%以上削減し今世紀中の出来る限り早い時期にゼロを目指すという目標であり、船舶からの排出される GHG 削減技術の重要性が一層高まっている。

船底から吹き出した空気が気泡となり船底を覆うことにより摩擦抵抗を低減させる空気潤滑法²⁾は、船舶の摩擦抵抗を低減させる実用化された唯一の手法である。国際海運に就航する大型外航船において摩擦抵抗は抵抗成分のうち大きな割合を占めるため、空気潤滑法は GHG 削減に有効な手法であると言える。近年ではクルーズ客船を中心に搭載が進み、2018 年までに 23 隻の船舶に実船搭載されている³⁾。一方、抵抗低減の詳細なメカニズムについては未だ明らかになっておらず、これを明らかにすることにより気泡の制御等が可能となり抵抗低減効果が向上することが期待される。

空気潤滑法に代表される気泡による抵抗低減の研究においては、摩擦抵抗低減量を見積もるため、局所の摩擦抵抗である壁面せん断応力の評価が重要である。壁面せん断応力の計測法は、直接法と間接法に大別される⁴⁾。直接法は、浮動片要素 (Floating element) に作用するせん断応力を直接計測するものである。間接法は、障害物を利用する手法 (プレストン管、スタントン管、レーザーブレード法、サブレイヤーフェンス)、速度分布を利用する手法 (クラウザー線図法)、熱伝達 (ホットワイヤー、ホットフィルム、MEMS) を利用する手法などがある⁵⁾。間接法は単相流における速度分布や実験係数を基にしており、本研究で対象となる気泡流においてはこれらの理論が適用出来るか不明であるため間接法は用いる事が出来ず、直接法を用いる必要がある。先行研究においては、カンチレバーの先端に浮動片要素を接続し、浮動片要素の変位に伴うカンチレバーのひずみを半導体ひずみゲージで計測するという形式のせん断応力計が国内の研究では多く用いられてきた⁶⁻¹¹⁾。また本現象においては、流れ方向における抵抗低減効果の変化を把握することも重要である。田中らは、長さ 36 [m] の模型船に計 23 個の半導体ひずみゲージ式せん断応力計を取り付けて流れ方向の位置による影響を評価した¹²⁾。一方、半導体ひずみゲージ式せん断応力計の計測ではセンサーに対応してひずみアンプが必要となり、大規模な多点計測を行う際は計測システムが複雑化してしまう。また、近年電気分解によって発生したマイクロバブルにより、空気潤滑法などのミリスケールのバブルより大きな抵抗低減が得られるという報告がある¹³⁾。この電気分解によって発生させ

たマイクロバブルによる抵抗低減効果を正確に評価するためには直接法のせん断応力計により計測を行う必要があるが、電気分解状態においては磁気抵抗効果により電気抵抗が変化してしまうため、既往の半導体ひずみゲージ式せん断応力計では計測を行うことができない。

ここで、ひずみゲージに代わるひずみの計測手法として、Fiber Bragg Gratings (FBG) センサーがある。FBG は光ファイバーの内部に形成した回折格子を指す。光ファイバーに光を入射すると、FBG を通過する際プラグ波長と呼ばれる特定の波長成分が反射される。FBG が変形すると回折格子間隔が変化し、プラグ波長も変化する。FBG センシングは、この波長変化からひずみを計測するものである。FBG センシングの特徴として、まずそれぞれの FBG の回折格子間隔を変化させることにより 1 台の計測器により多数の多点計測が可能という特徴がある（波長分割多重伝送方式、Wavelength Division Multiplexing, WDM）。船舶海洋分野においては、Waskito らが FBG を利用した圧力計により、波長分割多重伝送方式を用いて船体表面 333 点の圧力分布計測を実施している¹⁴⁾。また長距離計測も可能なため、FBG センシングは大型の模型船を利用したせん断応力の流れ方向多点計測に適していると言える。

次に FBG センシングは、その他の電磁界ノイズの影響を受けないという特徴を持つ。Segawa らは、その特徴を活かしプラズマアクチュエータが作動する翼における剥離の検出に FBG センサーを用いている¹⁵⁾。同様に、高い抵抗低減効果が確認されている電気分解マイクロバブルの発生中でも、FBG センサーでは計測が可能であると考えられる。また電気を用いていないため、センサー部に防水加工を施すことなく水中での使用が可能である。以上の点から、FBG センサーを利用したせん断応力計の開発は気泡による抵抗低減現象の解明に大きく貢献すると考えられる。

FBG の流体せん断応力計への適用は、2003 年 Segawa らが浮動片要素と周囲壁面間に FBG センサーを配置し、せん断応力の計測を行ったのが、せん断応力だけでなく流体力の計測に用いられた初めての例である¹⁶⁾。その後 FBG のせん断応力計への適用事例は見られなかったが、2012 年には上述の既往の半導体ひずみゲージ式せん断応力計同様、カンチレバーのひずみを FBG により計測する方式のせん断応力計が製品化されている¹⁷⁾。しかしながら、FBG を利用したせん断応力計の計測精度や、気泡流中での計測に対する適用可能性については十分に議論がされていない。

そこで本研究においては、FBG をセンサーに用いたせん断応力計（以下、FBG せん断応力計もしくは FBG-SSS）を開発し、気泡流中での計測への適用可能性について調査した。開発した FBG せん断応力計の基本的な特性については既に報告しているが¹⁸⁾、本報では静的荷重に対する特性、動的荷重に相当する単相流中や気泡流中の時間平均値、また変動成分について、既往の半導体ひずみゲージ式せん断応力計（以下、SCSG-SSS）と比較することにより、より詳細な調査を実施した。

2. 実験手法

2.1 せん断応力計

2.1.1 FBG せん断応力計

直径 10 [mm] の浮動片要素（検査面）にかかるせん断応力を計測する、直接法によるせん断応力計を開発した（株式会社シミウス製作）。その写真を図 2.1 に、外形状を図 2.2 に、内部構造を図 2.3 に、仕様を表 2.1 に示す。本せん断応力計は、直径 22 [mm] のフランジ部分が流路の上部壁面と一致するように取り付けて使用される。浮動片要素はロッドの先端に取り付けられており、せん断応力を受けると浮動片要素は周囲のフランジとの間の 0.5 [mm] のギャップ内で変位する。この変位をロッドに生じるひずみから計測する（カンチレバー方式）。ロッド周囲の空間（せん断応力計内部）は水で満たされて使用される。ロッドは直径 1.0 [mm] のステンレス製で、ひずみを計測するための FBG が貼り付けられている。ロッドの流れ方向（X 方向）およびスパン方向（Z 方向）に FBG を貼り付けることにより、流れ方向だけでなく、スパン方向の計測も可能とした。ここで、FBG センシングにおけるひずみの計算方法を説明する。主流方向の上流側に貼り付けられた FBG01 におけるプラグ波長を λ_B^{FBG01} とする。流れの中に本せん断応力を設置した場合、FBG01 では引張ひずみが生じ、その時のプラグ波長 $\lambda_B^{FBG01'}$ は λ_B^{FBG01} に対し大きくなる。この時、プラグ波長のシフト量 $\Delta\lambda_B^{FBG01}$ は(2.1)式で定義される。

$$\Delta\lambda_B^{FBG01} = \lambda_B^{FBG01'} - \lambda_B^{FBG01} \quad (2.1)$$

本 FBG のゲージファクター F_g は 1.256 [pm/ $\mu\epsilon$] であり、FBG01 におけるひずみ $\Delta\varepsilon^{FBG01}$ は(2.2)式で求められる。

$$\Delta\varepsilon^{FBG01} = \Delta\lambda_B^{FBG01}/F_g \quad (2.2)$$

ここで、本せん断応力計においては、各検力方向のロッドの両面に FBG を貼付し、その差分を取ることで、温度補償（動作温度範囲 : -20~80 [°C]）および高感度化を実現した（ひずみゲージにおける 2 ゲージ法に相当）。 X 方向のひずみ $\Delta\varepsilon^X$ は(2.3)式で求められる。

$$\Delta\varepsilon^X = \Delta\varepsilon^{FBG01} - \Delta\varepsilon^{FBG02} \quad (2.3)$$

ここで、 $\Delta\varepsilon^{FBG02}$ は FBG02 におけるひずみである。流れにおいては、FBG02 は圧縮ひずみが生じ $\Delta\varepsilon^{FBG02}$ は負の値を取る。そのため、FBG01 と FBG02 の差分を用いる事により、それぞれのひずみに対して出力が約 2 倍となる。スパン方向においても同様の手順によりひずみが計算される。

光ファイバーに光を入射、またその反射光を計測するための光インターログータには、Micron Optics si255 を使用した。その仕様を表 2.2 に示す。

表 2.1 FBG せん断応力計仕様

| | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|------|
| Manufacturer | CMIWS Co.,Ltd. | |
| Type | PT-02 | |
| Measuring range | Approximately ±624 | [Pa] |
| Measuring direction | Streamwise and spanwise direction | |
| Temperature compensation range | -20 ~ 80 | [°C] |
| Natural frequency | 310 | [Hz] |

表 2.2 光インターログータ仕様

| | | |
|------------------------------------|-------------------|------|
| Maximum sampling rate | 1,000 | [Hz] |
| Wavelength range | 160 (1460 ~ 1620) | [nm] |
| Wavelength accuracy | 1 | [pm] |
| Wavelength stability | 1 | [pm] |
| Wavelength repeatability | 1 | [pm] |
| Wavelength repeatability at 1 [Hz] | 0.05 | [pm] |
| Dynamic range (peak) | 25 | [dB] |
| Dynamic continuous (FS) | 40 | [dB] |



図 2.1 FBG せん断応力計の写真

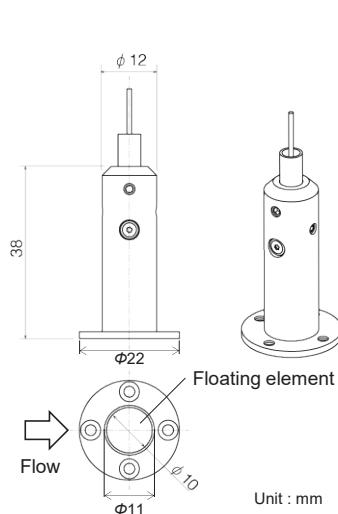


図 2.2 FBG せん断応力計の外形図

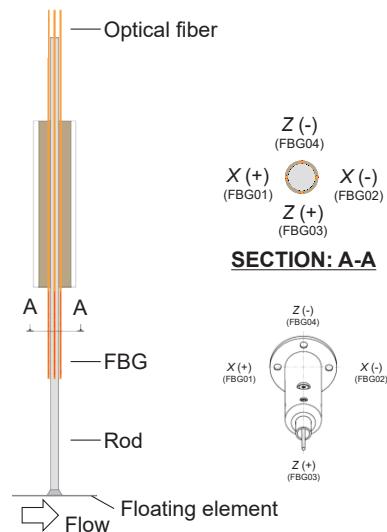


図 2.3 FBG せん断応力計の内部構造

2.1.2 半導体ひずみゲージ式せん断応力計

FBG せん断応力計との比較を行う、半導体ひずみゲージ式せん断応力計について説明する。ここでは、多くの先行研究で用いられている SCSG-SSS を用いた。その写真を図 2.4 に、外形図を図 2.5 に、仕様を表 2.3 に示す。FBG-SSS の外形状は、本 SCSG-SSS のそれを踏襲している。SCSG-SSS の検力機構も、カンチレバー方式であり、カンチレバーに生じるひずみを半導体ひずみゲージにより計測する。またカンチレバーは平板形状であり、流れ方向のせん断応力のみ計測可能である。

せん断応力計の出力は、DC ストレインアンプ（日章電機、DSA-100）により増幅し、AD 変換器により計測した。またレンジオーバーを防ぐため、DC ストレインアンプで 30 [Hz] のローパスフィルターを用いた。サンプリングレートは 100 [Hz] とした。

表 2.3 半導体ひずみゲージ式せん断応力計の仕様

| | | |
|--------------------------------|---------------|-----------|
| Manufacturer | SSK Co., Ltd. | |
| Type | S10W-2 | |
| Serial number (S/N) | 958 | |
| Rated capacity | 249.7 | [Pa] |
| Natural frequency | 160 | [Hz] |
| Response frequency | 40 | [Hz] |
| Output voltage | 30 | [mV/6VRO] |
| Overload | 150 | [%RO] |
| Non-linearity | 1 | [%RO] |
| Hysteresis | 1 | [%RO] |
| Repeatability | 0.5 | [%RO] |
| Temperature characteristic | 0.05 | [%RO/°C] |
| Temperature compensation range | -15 ~ +75 | |
| | [°C] | |

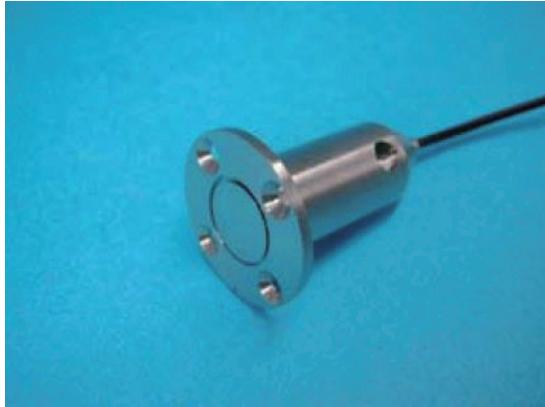


図 2.4 半導体ひずみゲージ式せん断応力計の写真

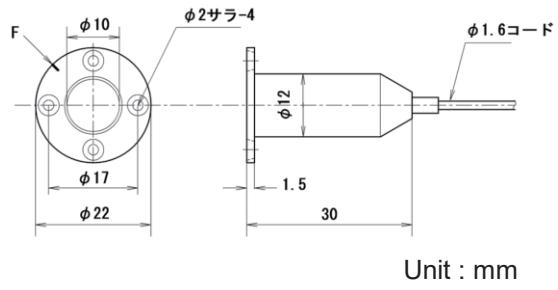


図 2.5 半導体ひずみゲージ式せん断応力計の外形図

2.2 静的荷重試験方法

静的荷重に対する FBG-SSS および SCSG-SSS の特性を調査するため、また荷重とひずみの関係を得るためにキャリブレーションに静的荷重試験を実施した。ここで乱流せん断応力は、例えば本研究で使用する水平チャネルにおいて断面内平均流速 $U_m = 5 \text{ [m/s]}$ で 53 [Pa] 程度（水温 20°C の場合）と非常に微小であり、せん断応力計の定格容量もそれに対応して数 100 [Pa] 程度に設定されている。そのため、せん断応力計のキャリブレーションは、センサーの容量オーバーに配慮しながら精度高く検定を実施する必要がある。そこで本研究においては、せん断応力計の検査面検力方向を重力方向と水平に設置し、検査面に貼り付けた付箋および針金に、ワッシャーと針金で構成されたウェイトをぶら下げる事により負荷をかけてキャリブレーションを実施した（図 2.6）。使用したキャリブレーション用ウェイトを図 2.7 に示す。ウェイト（ワッシャーと針金）の重量は個々に事前に電子天秤によって計測した値を用いた（有効数字 3 桁）。計測したウェイトの重量を表 2.4 に示す。

表 2.4 ウェイトの仕様

| Name | W1 | W2 | W3 | W4 | Total |
|--------|------|------|------|------|------------|
| Weight | 3.59 | 3.53 | 3.44 | 3.95 | 14.51 [mN] |

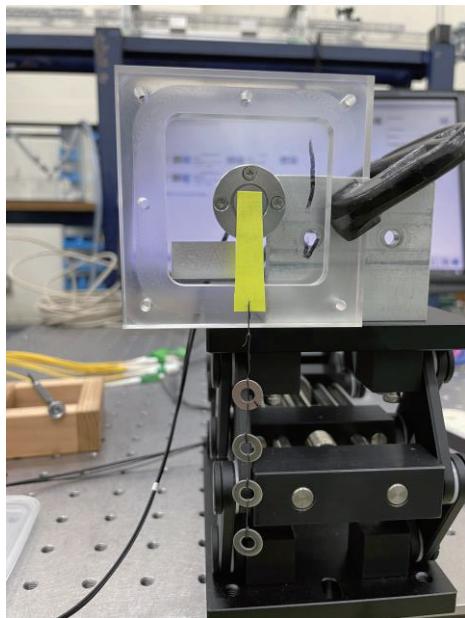


図 2.6 キャリブレーションの様子

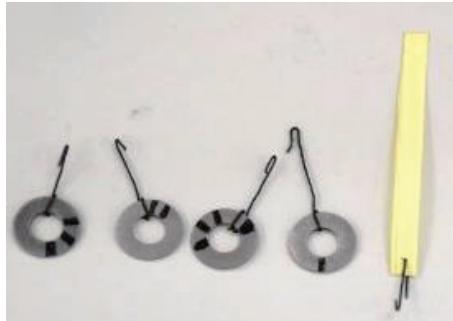


図 2.7 キャリブレーション用ウェイト

2.3 流体中での試験方法

乱流中のせん断応力の計測により、動的荷重に対する特性を調査する。国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所が所有する水平チャネルである小型高速流路にて計測を実施した。水平チャネルの概要図を図2.8に示す。本チャネルは長さ3,000 [mm]、幅100 [mm]、チャネル半高さ $h = 10$ [mm]のアクリル製の試験部を持つ。作動流体は水道水であり、電磁流量計によって制御されたポンプにより駆動され、試験部において完全発達乱流を実現する。せん断応力計は、試験部上流から1,575 [mm]下流の流路上面に取り付けられた。計測は、それぞれのせん断応力計によって別々に行われた。

空気吹き出しは、せん断応力計の500 [mm]上流の流路上面から行われた。空気吹き出し装置の概要図を図2.9に、空気吹き出し装置の底面（流路上面）に取り付ける配列多孔板の概要図を図2.10に示す。コンプレッサーによって圧縮空気を生成し、マスフローによって流量を制御し、空気吹き出し装置のチャンバー部へ供給する。その後、計315箇所の直径1.0 [mm]の穴を通して流路に供給される。

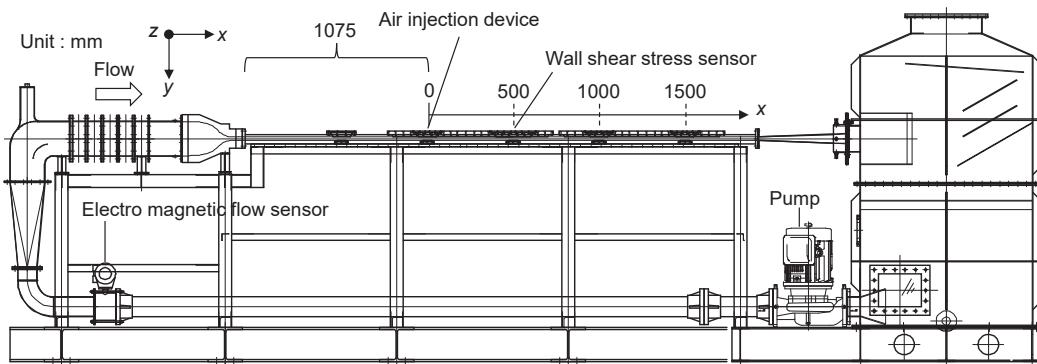


図2.8 水平チャネル概要図

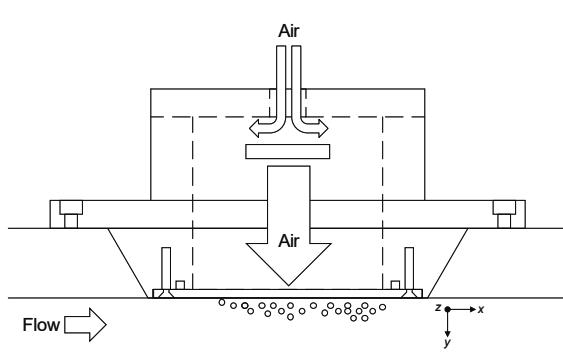


図2.9 空気吹き出し装置

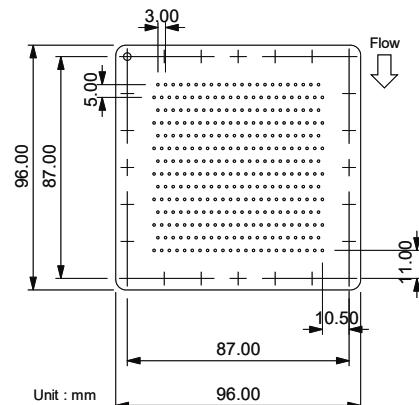


図2.10 空気吹き出し用配列多孔板

断面内平均速度 U_m は(2.4)式で定義される。

$$U_m = \frac{Q_l + Q_g}{S} \quad (2.4)$$

Q_l は液相流量、 Q_g は気相流量、 S は流路断面積である。次に、空間平均ボイド率は(2.5)式で与えられる。

$$\alpha_m = \frac{Q_g}{Q_l + Q_g} \quad (2.5)$$

ここで、単相流中にそのまま気泡を注入すると、液相断面内平均速度が加速することとなることがわかる。本研究では、気泡流中でも液相断面内平均速度を一定に保つため、(2.6)式により気泡流中の液相流量 Q_l を定めた。

$$Q_l = (1 - \alpha_m) \cdot S \cdot U_m \quad (2.6)$$

3. 計測結果

3.1 静的荷重試験

SCSG-SSS の X 方向、FBG-SSS の X 方向およびFBG-SSS の Z 方向の静的荷重とひずみの関係を図 3.1 ~ 3.3 に示す。ここで τ_x 、 τ_z はそれぞれ主流及びスパン方向のせん断応力を示す。またオーバーパーは時間平均を示す。SCSG-SSS と FBG-SSS 両者において静的荷重に対する線形性が確認できる。

非線形性とヒステリシスについて評価した結果を表 3.1 に示す。非線形は荷重増加時の各試験荷重と基準値線の差のうち最大の値、ヒステリシスは荷重増加時と減少時の同一荷重における出力の差のうち最大の値と定義される。ここでは、本試験での最大荷重 14.51 [mN] を作用させた時の出力を定格出力として、それに対する割合で評価を行った。まず、SCSG-SSS は FBG-SSS と比べて定格出力が大きくなることが分かる。これは、カンチレバーの形状による違いであると考えられる。SCSG-SSS の固有振動数は 160 [Hz] なのに対し（表 2.3）、FBG-SSS の固有振動数は 310 [Hz] であり（表 2.1）、FBG-SSS のカンチレバーのほうが剛性が高いことがわかる。これにより同じ荷重に対して FBG-SSS はひずみが小さくなっている。定格容量で正規化された非線形性とヒステリシスを見ると、いずれのセンサーにおいても 1 [%R.O.] 以下であることがわかる。このことから FBG-SSS は既往の SCSG-SSS と同等の静的荷重に対する性能を有することが確認できた。

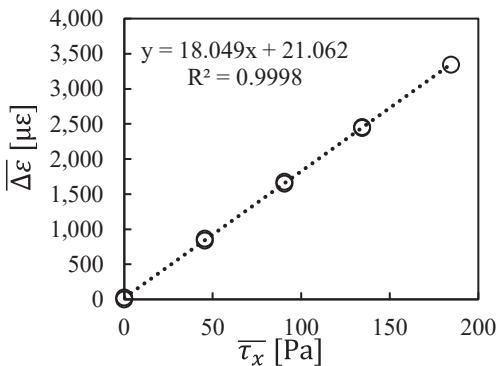


図 3.1 X 方向静的荷重とひずみの関係 (SCSG-SSS)

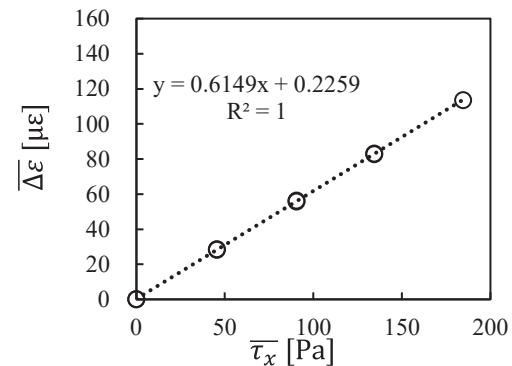


図 3.2 X 方向静的荷重とひずみの関係 (FBG-SSS)

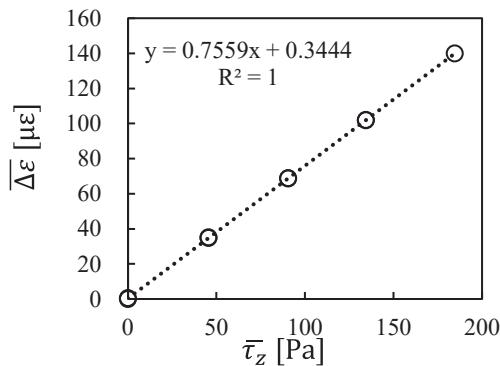


図 3.3 Z 方向静的荷重とひずみの関係 (FBG-SSS)

表3.1 キャリブレーション特性

| | SCSG-SSS (+X) | FBG-SSS (+X) | FBG-SSS (+Z) |
|-------------------------|-----------------------|--------------|----------------------|
| Rated output (R.O.) | 3,350 | 114 | [$\mu\epsilon$] |
| Calibration coefficient | 5.54×10^{-2} | 1.63 | [Pa/ $\mu\epsilon$] |
| | 10.4 | 0.543 | [$\mu\epsilon$] |
| Non-linearity | 0.311 | 0.475 | [%R.O.] |
| | 30.1 | 0.446 | [$\mu\epsilon$] |
| Hysteresis | 0.899 | 0.390 | [%R.O.] |

3.2 流体中での評価結果

3.2.1 時間平均値

ここでは、流体中の計測結果から FBG-SSS の動的荷重や気泡流中への適用可能性について評価する。まず単相流中の摩擦抵抗係数の計測結果について、比較を行う。実験条件を表 3.2 に示す。ここで Re_m はバルクレイノルズ数、 Re_τ は摩擦レイノルズ数で、(3.1), (3.2)式でそれぞれ与えられる。

$$Re_m = \frac{U_m \cdot h}{\nu} \quad (3.1)$$

$$Re_\tau = \frac{u_\tau \cdot h}{\nu} \quad (3.2)$$

ここで、 ν は動粘性係数、 u_τ は摩擦速度である。摩擦速度は(3.3)式で与えられる Dean の経験式¹⁹⁾から求められる単相流中の摩擦抵抗係数 C_{f0} と(3.4), (3.5)式で定義されるせん断応力と摩擦抵抗係数、摩擦速度とせん断応力の関係から求められる。

$$C_{f0} = 0.073(2Re_m)^{-0.25} \quad (3.3)$$

$$\tau_x = C_f \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_m^2 \quad (3.4)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_x}{\rho}} \quad (3.5)$$

ここで、 ρ は液相の密度である。計測は $\overline{U_m} = 1$ [m/s] 每に 30 [s] 間行った。

図 3.4 に SCSG-SSS および FBG-SSS によって計測された、バルクレイノルズ数と単相流中摩擦抵抗係数の関係を示す。実線は Dean の経験式によって求められた摩擦抵抗係数、破線はその ±10 [%] である。図中の速度は断面内平均流速を意味する。両者において、 $\overline{U_m} = 3$ [m/s] 以上 ($Re_m \cong 29,000$ 以上) では、Dean の経験式からの差が ±10 [%] 以内に収まっており、両者は時間平均単相流中摩擦抵抗係数に関して同程度の精度を持つことが確認できる。これにより、FBG-SSS は単相流中の時間平均摩擦抵抗係数を既往のせん断応力計と同等の精度で計測可能なことが確認できた。

またせん断応力計測における誤差の主要因は検査面とその周囲とのギャップにある⁵⁾。そこで、パターン投影法に基づく 3 次元形状測定機 (Keyence, ワンショット 3D 形状測定機 VR-3100) により検査面周囲の計測を行った。表 3.3 に検査面の上流 (Fore), 下流 (Aft), 左右における周囲フランジとのギャップとその平均値を示す。正の値は検査面が周囲より高くなっている (流路中央に向かって突出している) ことを意味する。平均値を見ると、SCSG-SSS では検査面が周囲より 1 [μm] 高くなっているのに対し、FBG-SSS では 23 [μm] 周囲より低くなっている。 $\overline{U_m} = 5$ [m/s] 以上 ($Re_m \cong 48,000$ 以上) において、SCSG-SSS の摩擦抵抗係数に対し、FBG-SSS の計測値が小さい値を取るのはこれが要因と考えられる。一方、SCSG-SSS においてもセンサーによって検査面のギャップは様々な値を取ることがわかっている²⁰⁾。そのため、直接法のせん断応力計の製作においては、検査面と周囲とのギャップを出来るだけ小さくすることが重要である。

表 3.2 単相流中計測実験条件

| | SCSG-SSS | FBG-SSS | |
|----------------------|------------------------|------------------------|-------|
| $\overline{U_m}$ | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 | [m/s] |
| $\overline{T_w}$ | 19.2 - 19.5 | 18.7 - 18.9 | [°C] |
| $\overline{Re_m}$ | 9,840 - 78,360 | 9,670 - 77,570 | [-] |
| $\overline{Re_\tau}$ | 550 - 2,990 | 540 - 3,326 | [-] |

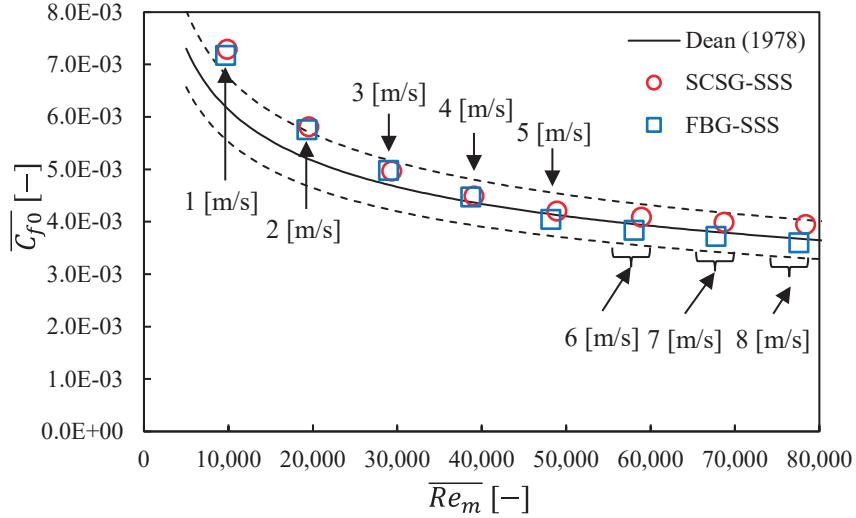


図 3.4 バルクレイノルズ数と単相流中摩擦抵抗係数の関係

表 3.3 検査面と周囲との高さ方向のギャップ

| | SCSG-SSS | FBG-SSS | |
|---------|----------|---------|------|
| Fore | -27 | -20 | [μm] |
| Aft | 28 | -28 | [μm] |
| Left | -1 | -38 | [μm] |
| Right | 3 | -7 | [μm] |
| Average | 1 | -23 | [μm] |

次に気泡流中における摩擦抵抗の評価について、検証を行う。表 3.4 に実験条件を示す。 $\overline{U_m} = 5$ [m/s]においてボイド率を変化させて実験を行った。図 3.5 に空間平均ボイド率の摩擦抵抗変化率の関係を示す。 $\overline{C_f}$ は気泡流中の摩擦抵抗係数である。SCSG-SSS による計測では、空間平均ボイド率を変更する前に単相流中の計測を行いその比を評価した。一方、FBG-SSS による計測では単相流中の計測の後、空間平均ボイド率を変化させて計測を行い、最初に計測した単相流中の摩擦抵抗係数に対する比を評価した。赤色の実線は、SCSG-SSS による計測結果の最小二乗法による線形近似線である。また二つの破線は、その近似線の $\overline{C_f}/\overline{C_{f0}}$ を±2 [%]変化させたものである。

$\overline{\alpha_m} = 1.5$ [%]を除いて FBG-SSS による計測結果は、SCSG-SSS の計測結果とよく一致している。 $\overline{\alpha_m} = 1.5$ [%]における不一致は、計測値のドリフトの影響であると考えられる。SCSG-SSS による計測では、空間平均ボイド率を変更する毎に単相流中の計測を行っていたが、その値を比較すると最初の計測値に対して最大±3 [%]の摩擦抵抗係数の変化を確認した。これは計測値がドリフトをしている事を意味する。このドリフトの正確な要因は不明であるが、せん断応力計内部へ気泡が混入し、センサー近傍に気液界面が形成され温度変化が生じているなどの可能性が考えられる。本研究における SCSG-SSS による計測では、空間平均ボイド率を変更する前に単相流中の計測を行いその比を評価することにより、このドリフトの影響を最小限化している。一方、本研究における FBG-

SSSによる計測においては、最初に計測した単相流中の摩擦抵抗係数に対する各空間平均ボイド率時の摩擦抵抗係数の比を評価したため、本ドリフトの影響をSCSG-SSSによる計測より受けやすい。ここで、空間平均ボイド率に対して抵抗低減率は概ね線形に変化することが知られている²⁰⁾。 $\bar{\alpha}_m = 1.5 [\%]$ におけるFBG-SSSによる計測結果の線形近似線からの差は2[%]以内、SCSG-SSSによる計測値との差は3[%]以内で、SCSG-SSSにより確認された計測値のドリフトの変化率と同程度である。この事から $\bar{\alpha}_m = 1.5 [\%]$ における不一致は、FBG-SSSにおいて計測値のドリフトの影響が生じたためと考えられ、今回SCSG-SSSで用いたドリフトの影響を小さくするような計測・解析手法を用いることにより、今後改善することが出来るはずである。これにより、FBG-SSSは単相流中に加えて気泡流中の時間平均摩擦抵抗係数に関して既往のせん断応力計と同等の精度で計測可能なことを確認することができた。また計測値のドリフトの要因を明らかにし、その対策を提案することが今後の課題として挙げられる。

表3.4 気泡流中計測実験条件

| | SCSG-SSS | FBG-SSS | |
|------------------|---------------------------------|------------------|-------|
| \bar{U}_m | 5 | 5 | [m/s] |
| $\bar{\alpha}_m$ | 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 | 0, 1.0, 1.5, 2.0 | [%] |
| \bar{T}_w | 19.2 – 19.4 | 18.7 – 20.3 | [°C] |
| \bar{Re}_m | 48,810 – 49,030 | 48,190 – 50,181 | [–] |
| \bar{Re}_τ | 2,220 – 2,230 | 2,190 – 2,280 | [–] |

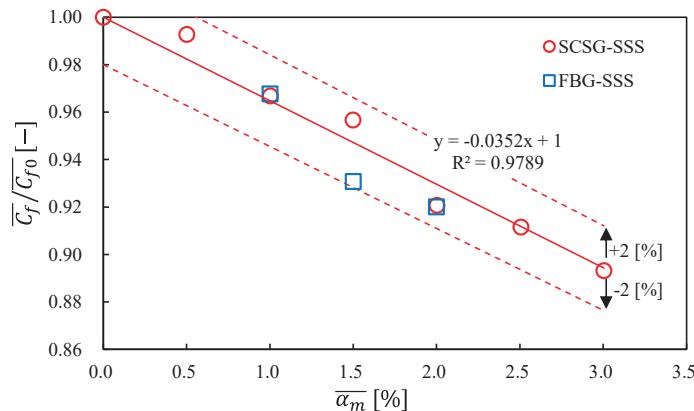


図3.5 空間平均ボイド率の摩擦抵抗変化率の関係

3.2.2 非定常成分

前項のせん断応力の時系列データを用いて、せん断応力の標準偏差、ヒストグラムおよびスペクトルを評価することによりFBG-SSSによるせん断応力の非定常成分の評価について検証する。 $\bar{\alpha}_m = 0 [\%]$ および約8[%]の摩擦抵抗低減を確認した $\bar{\alpha}_m = 2 [\%]$ を解析対象とする。ここで、SCSG-SSSにおいてはAD変換前に固有振動数の影響をアナログローパスフィルターにより除去している。FBG-SSSにおいては、カットオフ周波数100[Hz]の移動平均によるローパスフィルターを使用して、固有振動数の影響を排除した時系列データを作成し、これを対象に解析を行った。

表3.5にSCSG-SSSおよびFBG-SSSによって計測された主流方向時間平均摩擦抵抗係数 \bar{C}_{fx} に対する主流およびスパン方向摩擦抵抗係数標準偏差 $\sigma_{C_{fx}}$ 、 $\sigma_{C_{fx}}$ の割合 $\sigma_{C_{fx}}/\bar{C}_{fx}$ 、 $\sigma_{C_{fx}}/\bar{C}_{fx}$ を示す。ここで、気泡流中における \bar{C}_{fx} には気泡流中の \bar{C}_{fx} を用いている。両者において計測された主流方向の摩擦抵抗係数標準偏差 $\sigma_{C_{fx}}/\bar{C}_{fx}$ を比較すると、FBG-SSSのほうが大きい値を示していることが分かる。これは、FBG-SSSのほうがローパスフィルターのカットオフ周波数が高い事に起因していると考えられる。また、 $\sigma_{C_{fx}}/\bar{C}_{fx}$ は気泡流中では大きくなることが分かる。

SCSG-SSS と FBG-SSS 両者において、標準偏差は 35 [%]程度増加している。一方、スパン方向の摩擦抵抗係数標準偏差 $\sigma_{C_{fxz}}/\overline{C_{fx}}$ は気泡流中では 7 [%]程度減少している。

図 3.6 に主流方向摩擦抵抗係数ヒストグラムを示す。ここでは、横軸は単相流中の主流方向摩擦抵抗係数の時間平均値 $\overline{C_{fx0}}$ で無次元化している。SCSG-SSS と FBG-SSS によるヒストグラムは概ね一致しているが、SCSG-SSS のほうが急峻な分布となっている。これは標準偏差同様、カットオフ周波数の違いによる影響と考えられる。図 3.7 にスパン方向摩擦抵抗係数ヒストグラムを示す。図 3.6 よりも図 3.7 より、ヒストグラムにおいても標準偏差と同様に気泡流中における主流方向摩擦抵抗係数の分散の増加、スパン方向摩擦抵抗係数の分散の低下を確認した。

表 3.5 主流方向時間平均摩擦抵抗係数に対する摩擦抵抗係数標準偏差の割合

| $\overline{\alpha_m}$ [%] | SCSG-SSS | | FBG-SSS | |
|------------------------------|---|---|---|---|
| | $\sigma_{C_{fxz}}/\overline{C_{fx}}$ [%] | $\sigma_{C_{fx}}/\overline{C_{fx0}}$ [%] | $\sigma_{C_{fxz}}/\overline{C_{fx}}$ [%] | $\sigma_{C_{fx}}/\overline{C_{fx0}}$ [%] |
| 0 | 6.6 | 8.4 | 4.3 | |
| 2 | 9.0 | 11.3 | 4.0 | |

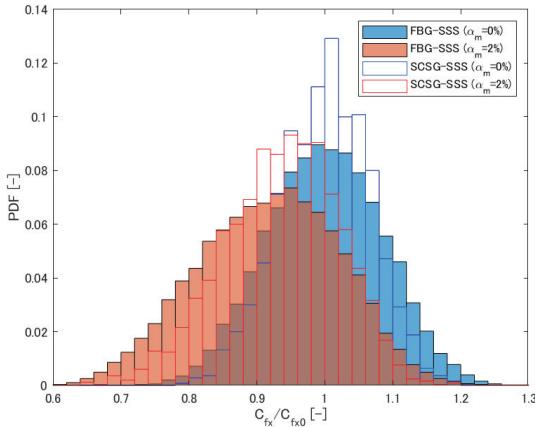


図 3.6 主流方向摩擦抵抗係数ヒストグラム

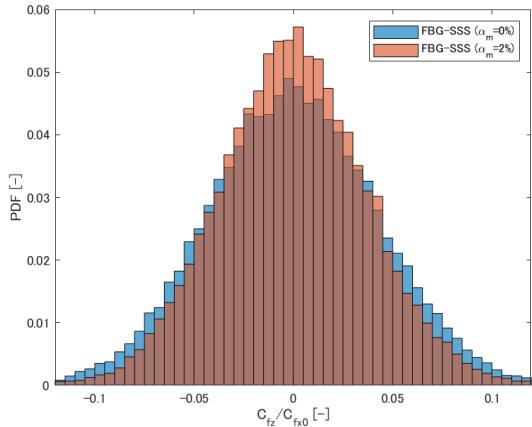


図 3.7 スパン方向摩擦抵抗係数ヒストグラム

図 3.8, 3.9 に $\overline{\alpha_m} = 0$ [%] および $\overline{\alpha_m} = 2$ [%] における主流方向摩擦抵抗係数リニアスペクトルをそれぞれ示す。ここでは、振幅のバラツキを小さくして比較がしやすいように、0.2 [Hz]毎に近傍 ± 0.08 [Hz] の振幅を平均した値を表示している。SCSG-SSS と FBG-SSS で共通して評価可能な 15 [Hz]以下において、両者のスペクトルはよく一致している。これより、FBG-SSS によるせん断応力の非定常成分も SCSG-SSS と同様の精度で評価可能であることがわかった。図 3.10 に FBG-SSS により計測された $\overline{\alpha_m} = 0$ [%] および $\overline{\alpha_m} = 2$ [%] における主流方向摩擦抵抗係数リニアスペクトルを示す。20 [Hz]以下においてせん断応力の振幅が単相流中に對し大きくなっていることがわかる。同様の傾向は SCSG-SSS による計測結果でも確認されている。ここで、Park らは乱流境界層に空気を吹き込んだ際に、流れ方向にボイド波と呼ばれる気泡群の粗密が発生することを報告した^{21,22}。筆者らは本実験条件において画像計測から数ヘルツのボイド率の変動を確認しており、この 20 [Hz]以下の振幅の増加はボイド波の発生によるものであると考えられる。主流方向摩擦抵抗係数リニアスペクトルより、標準偏差およびヒストグラムにおける気泡流中でのせん断応力の分散の増加は、20 [Hz]以下において生じていることを確認した。

図 3.11 に FBG-SSS によって計測された $\overline{\alpha_m} = 0$ [%] および $\overline{\alpha_m} = 2$ [%] におけるスパン方向摩擦抵抗係数リニアスペクトルを示す。単相流および気泡流中における有意な差は確認できない。ここで、筆者らは FBG せん断応力計による計測結果においてスパン方向摩擦抵抗係数のリニアスペクトルの 20 [Hz]以下の振幅の増加を報告していた¹⁸。一方、その際サンプリングレート 1,000 [Hz] の時系列データを 100 [Hz] に再標本化したデータを対象に FFT 解析を行っていたため、エイリアシングが発生していたと考えられる。そのため、リニアスペクトルの評価

に関しては、本報告の結果が正確である。標準偏差およびスペクトルにおいては、気泡流中においてスパン方向摩擦抵抗係数の分散の低下が確認されていたが、標準偏差において減少率は7[%]程度と大きくなかったため、スペクトルでは確認できなかったものと考えられる。今後、気泡の分布や液相の流場と同時にせん断応力を計測することにより、本現象の抵抗低減効果への影響について検証が可能である。

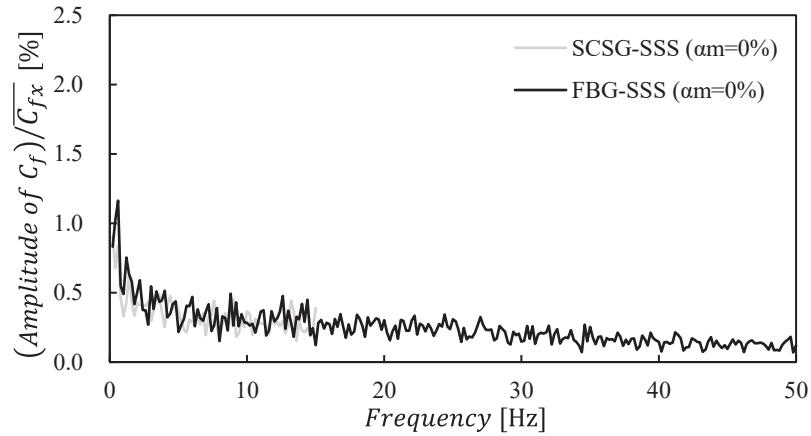


図3.8 主流方向せん断応力リニアスペクトル ($\overline{U_m} = 5$ [m/s], $\overline{\alpha_m} = 0$ [%])

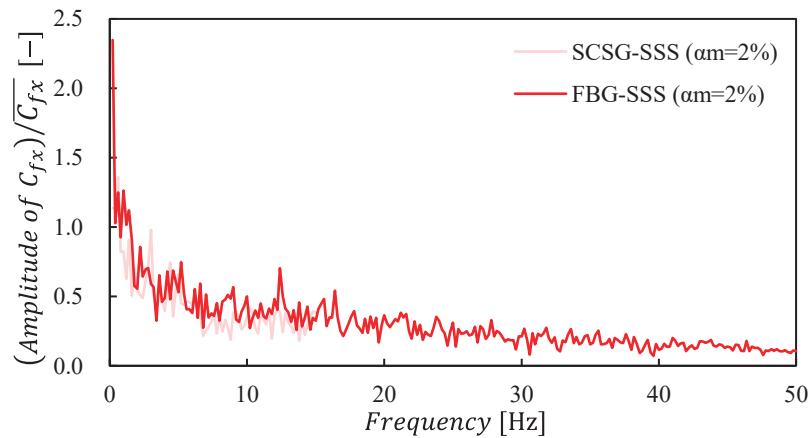


図3.9 主流方向せん断応力リニアスペクトル ($\overline{U_m} = 5$ [m/s], $\overline{\alpha_m} = 2$ [%])

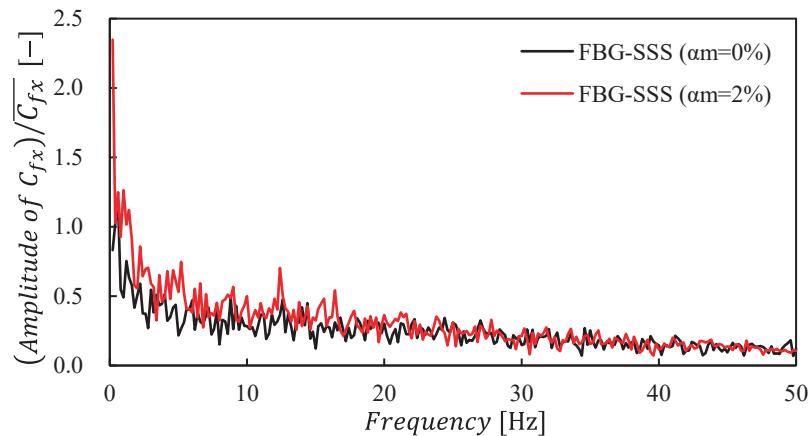


図3.10 主流方向せん断応力リニアスペクトル ($\overline{U_m} = 5$ [m/s])

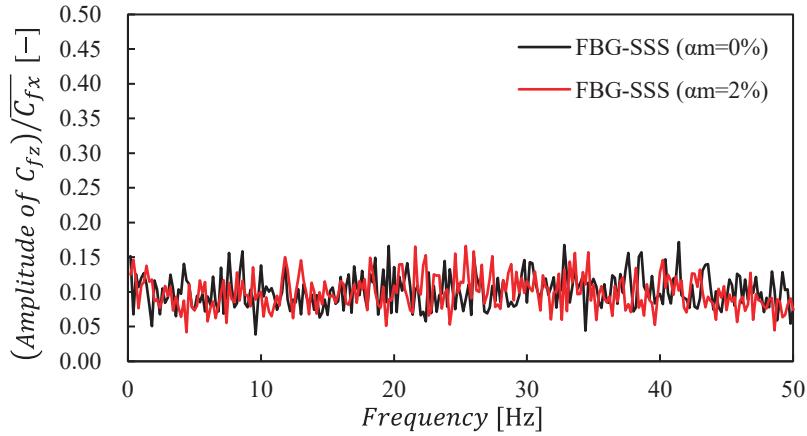


図 3.11 スパン方向せん断応力スペクトル ($\overline{U_m} = 5$ [m/s])

4. 結 言

本研究において、気泡による抵抗低減現象の解明のために必要な、せん断応力の大規模な多点計測の実現および電磁界ノイズ下でのせん断応力計を可能とするため、FBG をセンサーに用いたせん断応力計を開発した。開発した FBG せん断応力計の静的荷重に対する特性、動的荷重に相当する単相流中や気泡流中の時間平均値、また変動成分について、既往の半導体ひずみゲージ式せん断応力計と比較することにより評価を行い、気泡流中での計測への適用可能性について調査した。これにより以下が明らかになった。

- ・ カンチレバー方式の直接法のせん断応力計に対して、カンチレバーの主流方向およびスパン方向に FBG を貼り付け、2 方向の検力が可能な直接法のせん断応力計を開発した。各検力方向のロッドの両面に FBG を貼付し、その差分を取ることで、温度補償および高感度化を実現した。
- ・ 静的荷重試験により、FBG-SSS の静的荷重に対するひずみの特性を調査した。その結果、非線形性およびヒステリシスは定格出力の 1 [%]以下であり、既往の SCSG-SSS と同等の性能を有することがわかった。
- ・ 流体中での計測により、FBG-SSS の動的荷重に対する計測精度について検証した。その結果、FBG-SSS は単相流中および気泡流中のせん断応力の時間平均値を既往の SCSG-SSS と同等の精度で評価可能であることが分かった。またせん断応力の標準偏差、ヒストグラムおよびスペクトル解析により、非定常成分に関しても既往の SCSG-SSS と同等の精度で評価可能であることが分かった。
- ・ 約 8 [%]の摩擦抵抗低減を確認した $\alpha_m = 2$ [%] の気泡流中において、摩擦抵抗係数の標準偏差は単相流中に対し主流方向では約 35 [%]増加し、スパン方向では約 7 [%]低下した。またスペクトル解析により主流方向摩擦抵抗係数の増加は 0 – 20 [Hz]において生じていることがわかった。

謝 辞

本研究の一部は、防衛装備庁安全保障技術研究推進制度 Grant Number JPJ004596 の助成を受けて実施したものである。

References

- 1) Resolution MEPC.304(72) : Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, International Maritime Organization (2018)
- 2) Mizokami, S., Kawakita, C., Kodan, Y., Takano, S., Higasa, S., and Shigenaga, R., : Experimental study of air lubrication method and verification of effects on actual hull by means of sea trial, Mitsubishi Heavy Industry Technical Review, Volume. 47 (2010), pp.41-47.
- 3) American Bureau of Shipping : Air Lubrication Technology (2019). <https://www.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/Air%20Lubrication%20Technology.pdf>, (参照 2021-09-04).
- 4) Löfdahl, L., and Gad-el-Hak, M. : MEMS applications in turbulence and flow control, Progress in Aerospace Sciences, Volume 35, Issue 2 (1999), pp.101-203.
- 5) Mochizuki, S., and Kameda, T. : Measurement of the Wall Shear Stress in Studies of Wall Turbulence, Nagare : Journal of Japan Society of Fluid Mechanics, Volume 37, Issue 3 (2018), pp.261-266.
- 6) Guin, M. M., Kato, H., Yamaguchi, H., Maeda, M., and Miyanaga, M. : Reduction of skin friction by microbubbles and its relation with near-wall bubble concentration in a channel, Journal of Marine Science and Technology, Volume 1, Issue 5 (1996), pp.241-254.
- 7) Kodama, Y., Kakugawa, A., Takahashi, T., and Kawashima, H. : Experimental study on microbubbles and their applicability to ships for skin friction reduction, International Journal of Heat and Fluid Flow, Volume 21, Issue 5 (1999), pp.582-588.
- 8) Murai, Y., Fukuda, H., Oishi, Y., Kodama, Y., and Yamamoto, F. : Skin friction reduction by large air bubbles in a horizontal channel flow, International Journal of Multiphase Flow, Volume 33, Issue 2 (2007), pp.147-163.
- 9) Suzuki, K., Aoki, K., Hishida, K., and Kodama, Y. : Highly Magnifying PTV Measurement for Drag Reducing Turbulent Structure in a Microbubble Flow Channel, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B, Volume 74, Issue 742 (2008), pp.1247-1256.
- 10) Oishi, Y., Murai, Y., Tasaka, Y., and Yasushi, T. : Frictional drag reduction by wavy advection of deformable bubbles, Journal of Physics: Conference Series, Volume 147, Article number 012020 (2009).
- 11) Tanaka, T., Oishi, Y., Park, H.J., Tasaka, Y., Murai, Y., and Kawakita, C. : Repetitive bubble injection promoting frictional drag reduction in high-speed horizontal turbulent channel flows, Ocean Engineering, Volume 239, Article number 109909 (2021).
- 12) Tanaka, T., Oishi, Y., Park, H.J., Tasaka, Y., Murai, Y., and Kawakita, C. : Frictional drag reduction by bubble injection in turbulent boundary layers: Experiment with long model ship and full-scale estimation, Transactions of the JSME (in Japanese), Volume 88, No. 907 (2022).
- 13) Hara, K., Suzuki, T., and Yamamoto, Fujio. : Image analysis applied to study on frictional-drag reduction by electrolytic microbubbles in a turbulent channel flow, Experiments in Fluids, Volume 50, Issue 3 (2011), pp.715-727.
- 14) Waskito, K. T., Kashiwagi, M., Iwashita, H., and Hinatsu, M. : Prediction of nonlinear vertical bending moment using measured pressure distribution on ship hull, Applied Ocean Research, Volume 101, Article number 102261 (2020).
- 15) Segawa, T., Suzuki, D., Fujino, T., Jukes, T., and Matsunuma, T. : Feedback control of flow separation using plasma actuator and FBG sensor, International Journal of Aerospace Engineering, Volume 2016, Article number 8648919 (2016).
- 16) Segawa, T., Yoshida, H., Nishizawa, A., Murakami, K., and Mizunuma, H. : Sensors and actuators for smart control of separation, Theoretical and Applied Mechanics Japan, Volume 52 (2003), pp.117-125.
- 17) Jenkins, S. : Clementator: First inline, direct measurement of wall shear, Chemical Engineering, Volume 119, Issue 1 (2012), pp. 10.
- 18) Hiroi, T., Hamada, T., and Kawakita, C. : Development of Wall Shear Stress Sensor Using FBG, Conference Proceedings The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Volume 33, pp.103-105 (2021).
- 19) Dean, R. B. : Reynolds number dependence of skin friction and other bulk flow variables in two-dimensional rectangular duct flow, Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, Volume 100, Issue 2 (1978), pp.215-223.
- 20) Hiroi, T. : Research on skin-frictional drag change by bubbles in turbulent boundary layer, Doctoral thesis (2022).
- 21) Park, H. J., Oishi, Y., Tasaka, Y., and Murai, Y. : Void waves propagating in the bubbly two-phase turbulent boundary layer beneath a flat-bottom model ship during drag reduction, Experiments in Fluids, Volume 57, Issue 121, Article number 178 (2016).
- 22) Park, H. J., Tasaka, Y., and Murai, Y. : Bubbly drag reduction accompanied by void wave generation inside turbulent boundary layers, Experiments in Fluids, Volume 59, Issue 111, Article number 166 (2018).