

FBGを用いた表面貼付型多点圧力センサの開発

— 第2報 抵抗試験における定常圧力分布計測 —

学生員 若原 正人* 正員 谷上 明彦**
 正員 新郷 将司** 中島 円***
 正員 深沢 塔一*** 正員 金井 健**

Development of an affix-type multipoint pressure sensor by use of FBG

— 2nd Report: Multipoint pressure measurements on the surface of model ship in resistance test —

by Masahito Wakahara, *Student Member* Akihiro Tanigami, *Member*
 Syoji Shingo, *Member* Madoka Nakajima
 Toichi Fukasawa, *Member* Ken Kanai, *Member*

Summary

An affix-type multipoint pressure sensor was developed by using the Fiber Bragg Grating (FBG) technology. In the 1st report, the measurement system of FBG pressure sensor was described and the performance was confirmed in a pressure measurement test on a circular cylinder in uniform flow. In the 2nd report, the FBG pressure sensors were stuck on the surface of the fore- and aft-body of a model ship and resistance tests were conducted. The FBG pressure sensor enables to measure the multi-point pressures on curved surfaces of a ship with the temperature compensation. The measured pressures were compared with the result of CFD calculations, and the effects on the ship's resistance were investigated. It was found from the experimental results that the FBG pressure sensor is effective to measure multipoint pressure on the surface of the model ship in resistance tests.

1. 緒言

本研究では、船舶、航空機、自動車等の流体中を移動する物体の表面圧力分布計測を精度良くかつ簡便に行うために、光ファイバのFBG (Fiber Bragg Gratings) 技術を応用した表面貼付型多点圧力センサの開発を行った。本研究で開発した圧力センサを物体表面に直接貼り付けることにより、高感度での多点圧力計測が可能となり、またFBG温度センサを併用することで温度補償も容易に行うことができる。

第1報¹⁾では、水槽試験において模型船の表面圧力を計測するためのFBG圧力センサの基本的な仕様を定め、センサ性能の検証を行った。さらに、一様流中の円柱表面の圧力分布測定実験において、剥離前より前方の点での圧力はFBG圧力センサとひずみゲージ式センサとで良く一致することを示し、本圧力センサは定常流場における圧力計測に十分使用できることを確認した。

そこで、第2報では、模型船の抵抗試験において、FBG圧力センサを船体表面に貼付し、船体形状のような複雑な曲面を持つ物体表面の多点圧力測定への有効性の検証を行った。また、計測された抵抗値に対する圧力センサ

貼付の影響を調べ、FBG圧力センサの船体抵抗試験における適用性についての検討を行った。

2. 表面貼付型多点圧力センサ

2.1 FBG圧力センサの基本仕様

水槽試験において模型船の表面圧力を計測する場合、模型船の船首尾は曲率半径が小さく、また模型内が狭隘であるため、特に船首尾付近に通常の圧力センサを設置するには大きな困難が伴う。そこで、本研究では、圧力センサをポイント型化し、模型船船首部のように曲率半径が小さい箇所への設置を容易にした。また、船体抵抗に対する圧力計貼付の影響を極力抑えるため、センサ部を可能な限り薄型にした。ポイント型FBG圧力センサの構造をFig.1に示す。圧力センサの厚さは0.65 mmで、センサ裏面の粘着シートによって物体表面に容易に貼り付けることができ、また、試験終了後も、測定モデルに一切傷などを付けることなく簡単に取り外すことができる。

また、今回は船型水槽における抵抗試験で模型船表面圧力分布測定を行うが、CFDとの比較などを考えると、圧力の多点計測が必要となる。圧力の多点計測を実施する場合には、Fig.2に示すように、一本の光ファイバ上にFBG圧力センサを直列に配置するが、これは最大128ポイントまで設置可能である。センサ間隔は任意に定めることができ、光ファイバの全長は約100 kmまで延長することが可能である²⁾。なお、多点での圧力計測の場合、一

* 金沢工業大学大学院 工学研究科 博士課程

** 財団法人日本造船技術センター

*** 金沢工業大学 機械系

本のファイバに圧力センサがいくつも繋がることになるが、それぞれのセンサについて、そのセンサ以外の部分のファイバ変形や振動の影響を極力排除する必要が生ずる。そこで、センサのグレーティング部を固定している両端部に直径0.5 mmのステンレス製補強用パイプを設置し、ベース層と FBG ファイバの固定力を高めることで、他のセンサやファイバからの影響を抑えることとした。

なお、温度変化を伴う環境下で圧力測定を行う場合は、同じライン上に FBG 温度センサを配置することで温度補正を行うことができる。

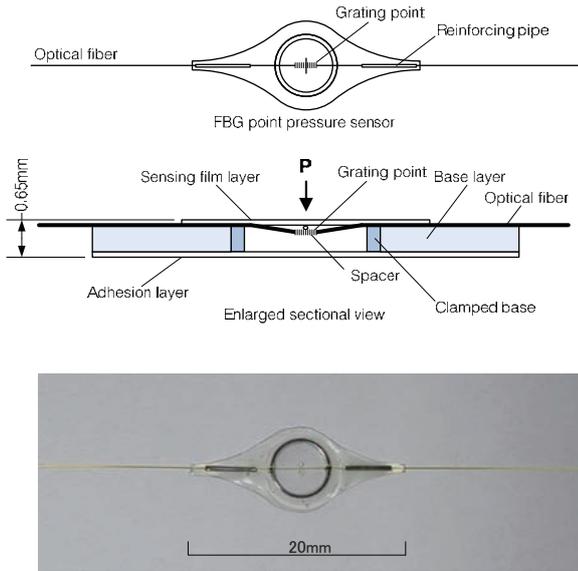


Fig.1 FBG point pressure sensor

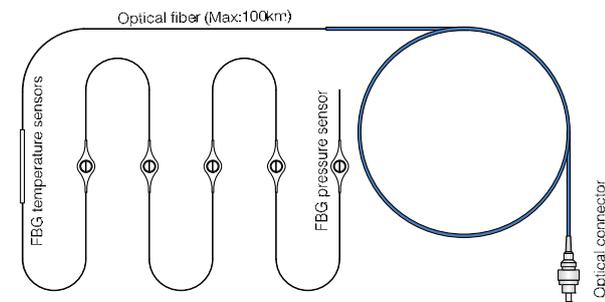


Fig.2 Affix-type FBG multipoint pressure sensor

2.2 水面付近の負圧への対応

船舶の水槽試験における圧力計測では、水面よりかなり下方に圧力計を設置する場合には、比較的大きな静水圧が加わるため、変動圧力があってもトータルの圧力が負になることはまず無い。しかしながら、水面近傍に圧力計を配置する場合は、変動圧力の大きさによっては圧力に負値が生ずる可能性が生ずる。FBG 圧力センサは、圧力によって光ファイバがたわみ変形し、ブラッグ波長が変化することを利用して圧力計測を行っているため、平衡状態から正の圧力が加わっても負の圧力が加わっても、圧力の絶対値が同じであれば同じ波長変動を示してしまう。第1報¹⁾においては、FBG 圧力センサで正圧のみを計測する原理を説明したが、ここでは負圧計測の原理について説明する。Fig.1 に示すように、ダイヤフラム

の受圧面フィルムと FBG ファイバのグレーティング部間のスペースを調節し、予め正圧側にファイバを変形させて、ニュートラル状態でグレーティング部に正圧側のひずみを与える。Fig.3 に、正圧・負圧の判別方法を示すが、まず、外圧を P_e 、初期圧を P_r と定義し、ゼロ点計測において圧力の加わらない時 ($P_e=P_r$) のブラッグ波長シフト量 $\Delta\lambda_B$ をゼロとする。正圧 ($P_e>P_r$) が加わった場合、ダイヤフラムが凹み、 $\Delta\lambda_B$ は正の値となるので正圧と判定することができる。一方、負圧 ($P_e<P_r$) が加わった場合は、ダイヤフラムが上面方向に膨らみ、 $\Delta\lambda_B$ が負の値になるので負圧と判定することができる³⁾。この正圧側のひずみ量を調節することで負圧側の測定範囲を調整することが可能となる。なお、今回の実験で使用した FBG 圧力センサでは $\phi 150 \mu\text{m}$ のスペースを用いたが、このスペース径のサイズを変更することで負圧側の測定範囲を調整することになる。

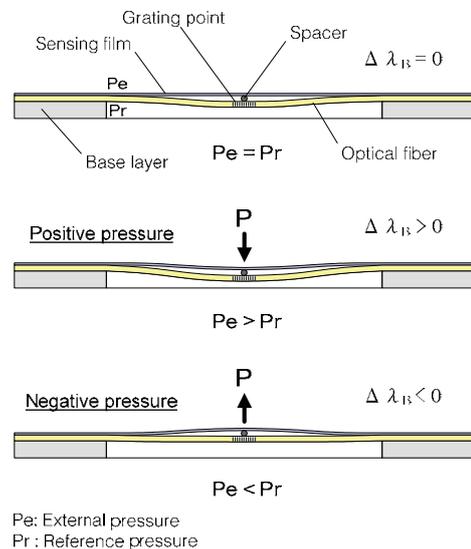


Fig.3 Deformation of sensing point due to positive and negative pressures

3. 抵抗試験における圧力計測

抵抗試験は、独立行政法人海上技術安全研究所の中型曳航水槽（全長 150m、幅 7.5m、水深 3.5m）において行った。使用した模型船は垂線間長 $L_{pp}=4.0\text{m}$ の肥大船で、曳航速度はフルード数 $Fn=0.14\sim 0.18$ とした。

3.1 FBGセンサの貼付方法

FBG 圧力センサの位置を(○)、温度補償用 FBG 温度センサの位置を(●)と表し、船首部の圧力測定箇所を Fig.4 に、船尾部の圧力測定箇所を Fig.5 に示した。FBG 圧力センサは、各 Water Line 毎に、船首部については 12m W.L. と 6m W.L.上に 5 点ずつ、船尾部について 10m W.L.と 2m W.L.上に 5 点ずつ配置した。また、FBG 温度センサを船首尾それぞれ各 W.L. 毎に 1 点配置した。なお、多点圧力測定のために、本実験では Fig.2 に示した 5 ポイントの FBG 圧力センサと 1 ポイントの温度補償用温度センサが直列に配置されたタイプを使用し、これを船首尾に各 2 組設置し、計 10 カ所の同時多点測定を実施した。また、

光源およびブラッグ波長の測定装置には Micron optics 社製の si425²⁾を使用した。FBG センサのサンプリングスピードは 250Hz、サンプリング時間は 1 秒間とし、FBG 圧力センサの出力値は FBG 温度センサの測定値を用いて温度補正を施した¹⁾。また、FBG センサを設置することによる船体抵抗への影響を調べるため、船首に FBG 圧力センサを貼付した場合と船尾に貼付した場合の圧力測定を別々に実施した。

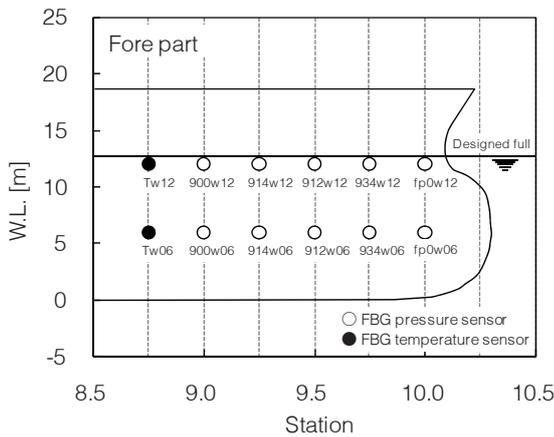


Fig.4 Affixed location of FBG sensor at fore-body

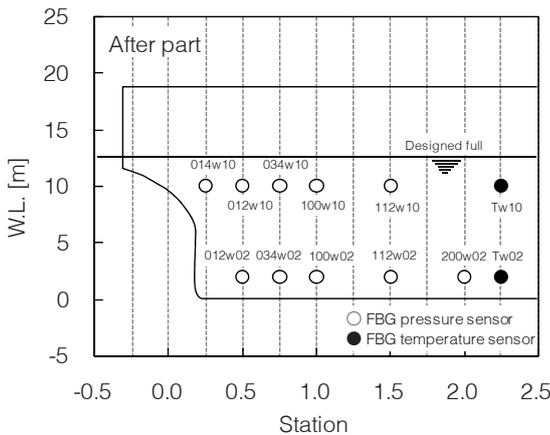


Fig.5 Affixed location of FBG sensor at aft-body

Fig.6 に、FBG 圧力センサの船体表面への貼付方法の詳細を示す。センサ設置時や試験中のセンサ破損に対処するため、本実験では最低 2 回の修復作業が可能ないように、FBG 圧力センサ間の光ファイバ長を 400 mm とした。圧力センサ貼付後のファイバの余長は、光ファイバの性能上補償させている半径 20 mm 以上の円を作り、4 カ所をドラフティングテープにて固定した。

センサ間を接合する光ファイバにはポリイミドコーティングタイプを使用した。ポリイミドコーティングタイプは絡まり難い特性を持っており、曲げや引張方向への強度も優れていることが知られており、接触や摩擦による表面劣化にも強く、高い耐久性を有している。また、径が 150 μm と非常に細く、髪の毛程度の太さしかないので、模型表面に貼付しても表面の凹凸が極めて少なく、船体抵抗に与える影響を最小限に抑えることができる。さらに、電線のように漏電や電気ノイズの影響も一切無く、設置作業への作業上の負担や水によるセンサの破

損の可能性も少ないことから、安定して多点測定を容易に行うことができる。FBG 圧力センサを貼付した船体の写真を Fig.7 に示す。

FBG 圧力センサは一度設置してしまえば長時間連続して使用することは可能であるが、被測定物からセンサを剥がす際にセンサが破損する恐れがある。そこで、本実験では、張替の際のセンサへのダメージを最小限にするため、FBG 圧力センサを厚み 0.2 mm のステンレスプレートに取り付け、このプレートを模型船の表面に貼り付けた。一方、FBG 温度センサについては、熱伝導率の良いアルミ箔で覆い模型船に直接設置した。

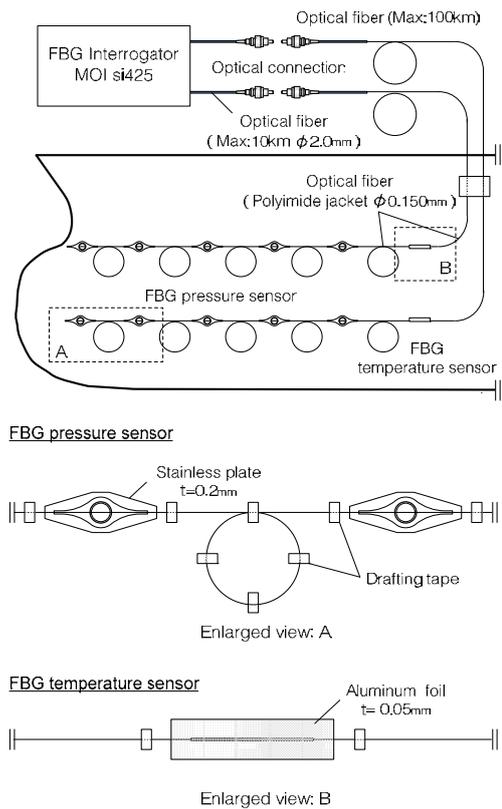


Fig.6 Affixed FBG sensors at fore-body

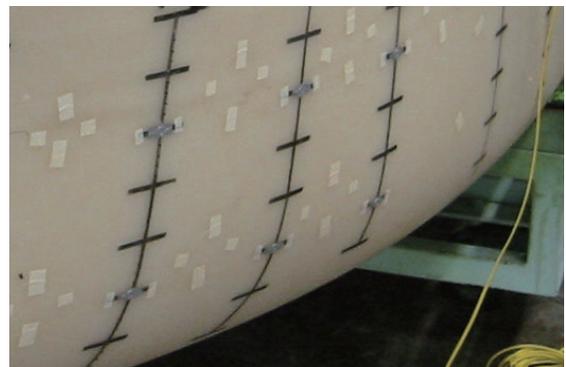


Fig.7 FBG sensor and optical fiber affixed on model ship

3.2 FBGセンサによる圧力計測結果

Figs.8, 9 に、模型船の曳航開始から停止までの間の FBG 圧力センサにおけるブラッグ波長のシフト量を時系列データとして示す。Fig.8 は船首部の測定値であり、Fig.9 は船尾部の測定値である。なお、実際の圧力値は、このブ

ラッグ波長のシフト量にキャリブレーション係数を乗ずることによって、求めることができる。実験では、停止状態から加速された模型船は定常速度に達したのちに固定クランプが解除され、定常速度で約20秒間走行した後1秒間圧力測定を行い、さらに20秒程度走行して再びクランプされ、減速し停止する。Figs. 8, 9はこの間の圧力の変化に対応するブラッグ波長のシフトを捉えており、本研究で開発したセンサは定常走行時の船体表面圧力を測定する圧力センサとして十分な性能を持っていることが確認できる。

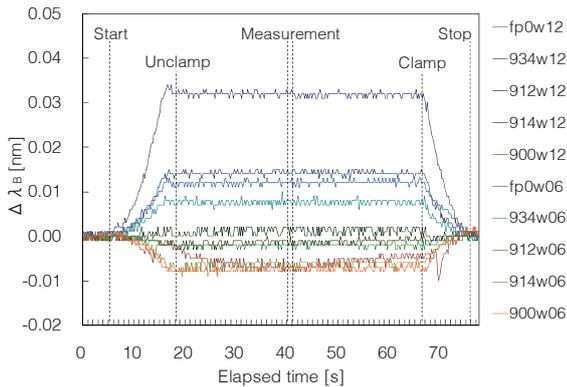


Fig.8 Time histories of Bragg wavelength shift of FBG pressure sensor at fore-body (Fn=0.18)

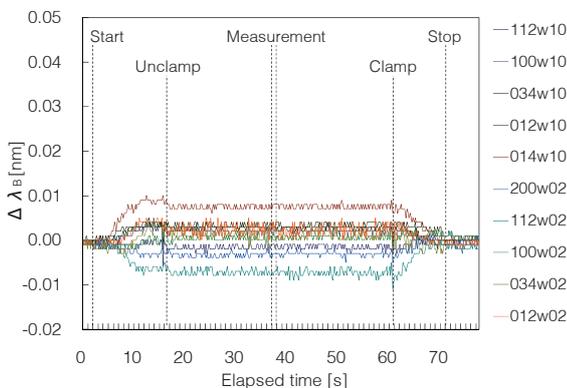


Fig.9 Time histories of Bragg wavelength shift of FBG pressure sensor at aft-body (Fn=0.18)

4. CFD解析

FBGセンサによる圧力測定結果と比較するためにCFD解析を行った。CFDの計算コードには、船体まわりの流場計算に実績がある平田らにより開発されたNEPTUNE⁴⁾を使用した。H-Oタイプのグリッドトポロジーを採用し、計算領域は、船体の片舷のみについて、船の長手方向は船首F.P.より前方1.0L_{PP}から船尾A.P.より後方に1.5L_{PP}までとし、船体の外周方向に半径1.5L_{PP}の範囲とした。格子分割数は、船の長手方向に128セル(F.P.から前方:16セル、船体部分:64セル、A.P.より後方:48セル)、ガス方向に40セル、船体外周方向に80セルとし、総格子数は3.45×10⁵である。なお、自由表面とセルの境界面が一致するようにセルを自由表面の下に配置しているが、前述のガス方向分割数はこの自由表面下から下方に船体表面に沿って配置されるセル数を意味し

ている。また、船体表面上における最小格子間隔は3.16×10⁻⁶とした。乱流モデルにはSpalart-Allmarasモデルを使用し、全ての領域で乱流と仮定して計算を行った。なお、L_{PP}ベースのフルード数で0.14, 0.16, 0.18について計算を行ったが、レイノルズ数はそれぞれ6.42×10⁶, 7.33×10⁶, 8.25×10⁶となる。このフルード数とレイノルズ数の関係は、概ね4.0mの模型船が静水中を移動する場合に対応している。

5. 実験と計算結果の比較

5.1 船首での圧力

各フルード数における船首部の圧力係数をFigs.10-12に示す。縦軸は圧力係数C_p、横軸は船首方向位置で、12m W.L.の測定結果を(●)、6m W.L.の測定結果を(○)で示した。またCFD計算結果を実線と破線で示した。なお、12m W.L.では、自由表面上の波により圧力点が空中に露出する場合は生じたが、その場合はC_pをゼロとした。FBGセンサによる測定値とCFD計算値は良い対応を示しており、結果はほぼ信頼のできるものであるといえる。なお、圧力測定値は、特に自由表面に近い12m W.L.において、S.S. 9 1/2からS.S. 9 3/4の間でやや急激な圧力の上昇が起きている。この現象は線形自由表面条件を用いたCFD計算結果には表れておらず、何らかの非線形影響であると思われるが、詳細については更なる検討が必要である。

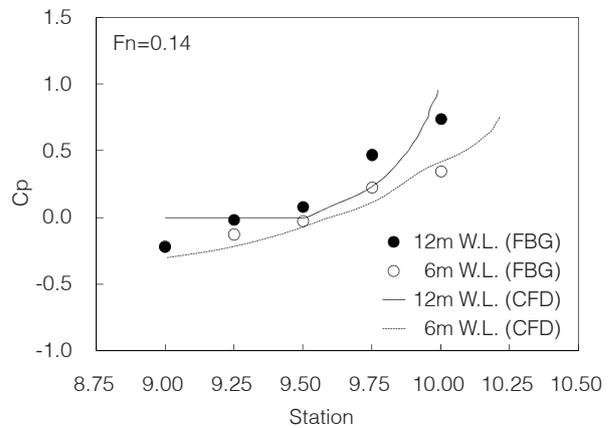


Fig.10 Measured and calculated pressures at fore-body (Fn=0.14)

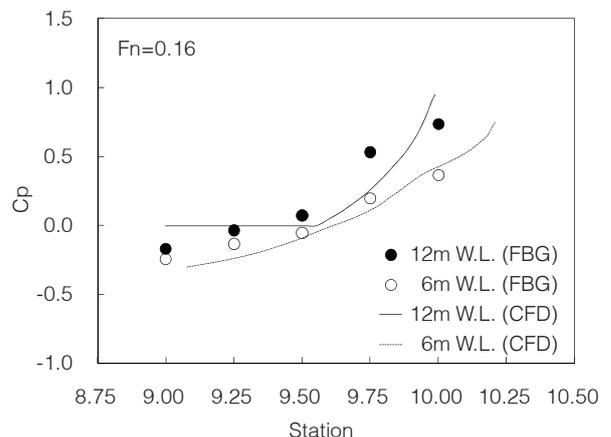


Fig.11 Measured and calculated pressures at fore-body (Fn=0.16)

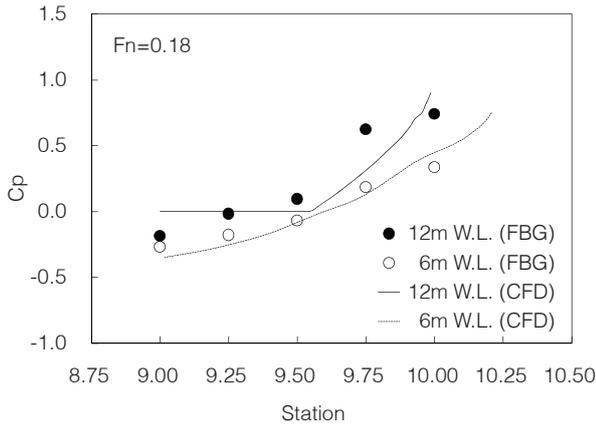


Fig.12 Measured and calculated pressures at fore-body (Fn=0.18)

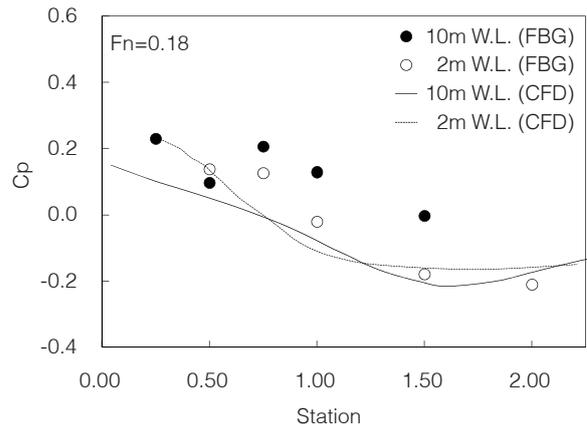


Fig.15 Measured and calculated pressures at aft-body (Fn=0.18)

5.2 船尾での圧力

各フルード数における船尾部の圧力係数を Figs.13-15 に示す。縦軸は圧力係数 C_p 、横軸は船首方向位置で、10m W.L.の測定結果を(●)、2m W.L.の測定結果を(○)で示した。また CFD 計算結果を実線と破線で示す。測定値と計算値の圧力変化の傾向はほぼ同じであるが、自由表面に近い 10m W.L.において S.S. 1/2 から S.S. 3/4 の間でやや急激な圧力計測値の変化が起こっている。この現象は、船首部と同様、何らかの非線形影響であると思われるが、詳細については更なる検討が必要である。

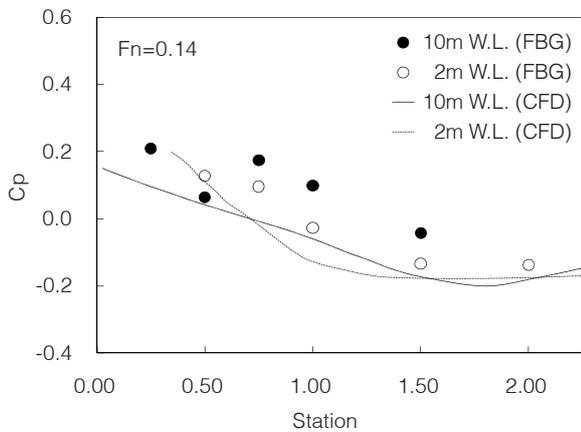


Fig.13 Measured and calculated pressures at aft-body (Fn=0.14)

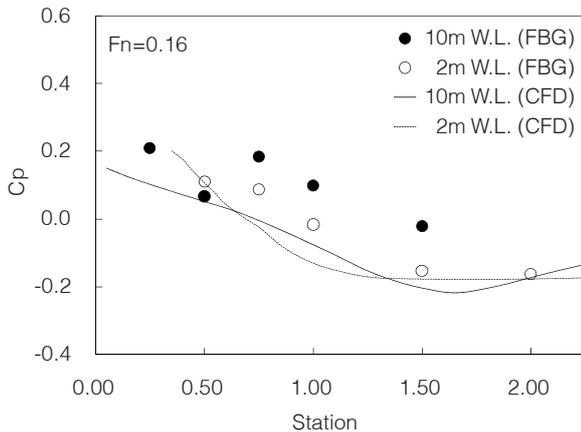


Fig.14 Measured and calculated pressures at aft-body (Fn=0.16)

5.3 船体抵抗

FBG 圧力センサは、従来の圧力センサのように模型に一切の加工を施すことなく、取り外しも容易である反面、設置したセンサ部や光ファイバにより船体の抵抗に影響を与える恐れがある。そこで、貼付した FBG 圧力センサが船体の抵抗にどの程度影響を及ぼすかを明らかにするため、センサを取り付けた場合と取り付けていない場合の船体抵抗の比較実験を行った。

各フルード数における全抵抗係数 C_{TM} を Fig.16 に示す。抵抗係数の無次元化は、(1)式に示すように、表面積を用いた。

$$C_{TM} = R / (0.5 \times \rho \times S_M \times V_W^2) \quad (1)$$

ここで、 R は全抵抗、 ρ は水の密度、 S_M は模型の表面積、 V_W は船速である。

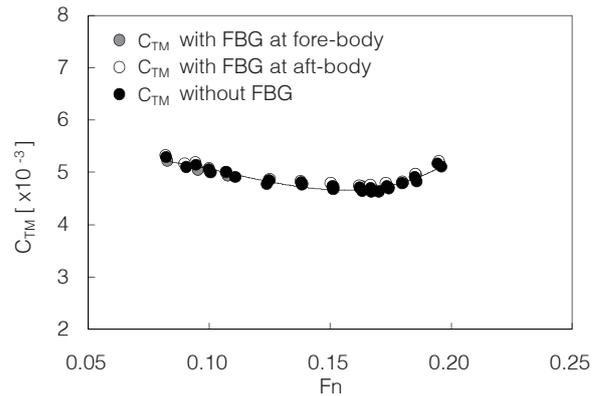


Fig.16 Total resistance coefficients

センサを取りつけない場合の全抵抗計測値については、最小二乗近似による 3 次元曲線でフェアリングし、それに対してセンサを取り付けた場合の結果がどの程度の範囲内にあるのか調べた。その結果、船首部に FBG センサを設置した場合、測定したフルード数の範囲ではセンサの有無による影響は確認できなかったが、船尾部に FBG センサを取り付けた場合は $Fn=0.16 \sim 0.20$ の範囲において最大で 3% 程度の抵抗増加があることがわかった。本実験では、センサの脱着の影響を最小限に抑えるため

t=0.2mm のステンレスプレートを使用した。圧力測定を抵抗試験と同時に行う場合、船尾への圧力センサ取り付けについては、注意を要すると思われる。

6. 考察

本実験では約15時間の長時間測定を行ったが、FBG圧力センサは破損することなく、局率半径の小さい測定ポイント(1.5m)でも剥離することなくすべての計測を行うことができた。また、センサを剥す際も模型に傷をつけることなく、短時間で剥すことができた。

なお、本実験では1ポートに5つのFBG圧力センサを用いて測定したが、センサの数を増やすことで、これまで「点」としてしか測定できなかった圧力を「面」として測定できる可能性がある。従来、「面」としての圧力分布情報はCFD解析に依存していたが、本研究で開発したFBG圧力センサを用いて圧力分布が計測できれば、CFD解析との併用により、これまで明らかにできなかった多くの現象を解明することが可能であると考えられる。

7. 結言

本研究では、表面貼付型多点圧力センサを貼付した船体模型を用いて中型曳航水槽による抵抗試験を実施し、模型船表面の定常圧力分布および船体抵抗の測定を行い、FBG圧力センサの有効性について検証を行った。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 本圧力センサは、船首、船尾といった比較的曲率半径の小さい箇所にも容易に貼付することができ、従来測定が難しかった箇所での圧力測定が可能となった。
- (2) 本圧力センサによって、圧力のリアルタイム多点測定が可能となり、定常圧力分布を容易に測定することが可能となった。

- (3) 本圧力センサの船体表面への貼付による船体抵抗への影響は、船首部に貼付した場合はほとんどなく、船尾部に貼付した場合は最大で抵抗が3%増加する。
- (4) 本圧力センサは、模型船への貼付および取り外しが短時間に行え、従来の圧力センサより取り扱いが容易である。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、多大なご助力を頂いた財団法人日本造船技術センターの平井実氏、新井明氏、福島寛司氏、高野雄平氏、内田麻木氏、金沢工業大学大学院工学研究科沼田翔太氏に深く感謝を申し上げます。なお、本研究で使用したFBG測定器はMicron Optics社より技術協力していただきました。ここに謝意を表します。

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金(課題番号No.19656053)の援助を受けて実施したことを付記する。

参考文献

- 1) 若原正人, 中島円, 深沢塔一, “FBGを用いた表面貼付型多点圧力センサの開発—第1報 圧力測定法とセンサ性能—”, 日本船舶海洋工学会論文集, 第7号, (2008).
- 2) Micron Optics Inc., Optical Sensing Interrogator si425, <<http://www.micronoptics.com/si425.htm>>, (2008).
- 3) 若原正人, 中島円, 深沢塔一, “FBGを利用した圧力センサの開発”, 日本機械学会 流体工学部門 講演会 講演概要集, No.06-21, (2006), p.5.
- 4) Hirata N. and Hino T., "An Efficient Algorithm for Simulating Free-Surface Turbulent Flows around an Advancing Ship", 日本造船学会論文集, Vol.185, (1999).