

模型船による船体表面圧力計測と新しい計測法の提案

1. はじめに

船体表面圧力の詳細な計測は、曳航水槽において日常的に行われる計測ではない。抵抗成分の分離や理論計算結果の確認などの目的で、過去には研究プロジェクトの一環として多くの手間と資金をかけて行なわれた事例はある。しかし抵抗・自航試験や伴流計測などと同じようにルーチンワークとして船体表面圧力計測が行われることは無かった。

一方CFDの発達により、我々は船体表面圧力の鮮やかなカラーコンターカーブを日常的に見ることができる。そしてそれを頼りにして船型改良や付加物開発に挑んでいるが、その計算結果と実現象の整合について議論することは少ない。これは、船体表面圧力や摩擦応力の分布を詳細に計測することは困難であるとあきらめ、計算された抵抗係数や自航要素などの積分値と試験結果の相関をよりどころに、あとは計算結果を信用するしか無い状況におかれているためであろう。

SRCではこうした状況を打破すべく、数年前より(株)シミュス、大阪府立大学と協力して、より簡易に低コストで精度よく船体表面圧力を計測することを目的に、曳航水槽用の新しい船体表面圧力計測法の開発を進めてきた。本稿では船体表面圧力計測の過去を振り返りつつ、現在開発中の船体表面圧力計測法の一端を紹介したい。

2. 船体表面圧力計測法

2.1 歴史

手元にある文献の中で最も古い船体表面圧力計測の資料は、造船協会誌第346号に掲載されたN.Hogbenによる論文「Ship Hull Pressure Measurement」の紹介記事¹⁾である。この論文では、船体表面に圧力孔を開け、プラスチックチューブにより導かれた圧力を、切り替え弁を介してマノメータに設置した精密水位計により読み取るという方法で船体表面圧力を計測している。現在でも行なわれている圧力孔―スキヤニバルブ―圧力変換器による船体表面圧力計測の原型が、60年以上前に行なわれていたことに驚きを感じる。切り替え弁は電氣的に制御されるなど効率的に多点の圧力を測ろうとする努力が随所に見られる。

1970年代から1980年代にかけて歪ゲージを用いた圧力変

換器が普及し、圧力を電気信号として高精度に計測することが可能となる。これに伴い船体表面の圧力計測例も増加する。この間の経過は1983年に開催された日本造船学会シンポジウム「船型開発と試験水槽」²⁾に詳しい。その後も、造船研究協会第196研究部会(以下SR196)では肥大船船尾の圧力計測³⁾が行われ、戸田等はシリーズ60船型についてプロペラ有無による圧力計測⁴⁾を行っている。21世紀に入ると久米等はKVLCC2の模型船両舷に400点以上の計測点を配し、直進時、斜航時の船体表面圧力を計測するとともに、不確かさ解析を行い、CFD計算と比較するための詳細なデータを得ている⁵⁾。

2.2 船体表面圧力計測法

船体表面圧力計測における圧力センサの設置方法を図1(日本造船学会、「船体周りの流れと船型開発に関するシンポジウム」テキスト⁶⁾、P219、Fig.24より転載)に示す。

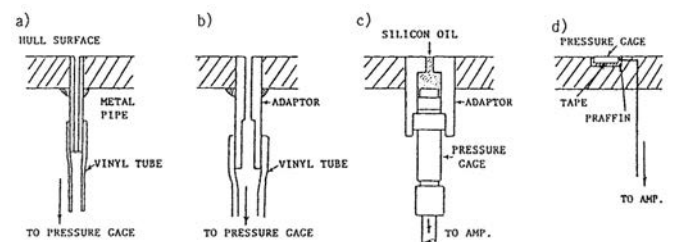


Fig. 24 Pressure tap

図1 圧力変換器の設置方法

図1を大別すると以下の二つの方法になる。

1) 導圧管を使用する方法(図1a)、b))

物体表面に微細な圧力孔を開け、導圧管を用いて圧力センサに圧力を導く。多くの場合、圧力センサの手前に導圧管の切り替え装置(スキヤニバルブ等)を設け、多点の圧力を効率よく計測できるように考慮する。圧力孔の内径は1mm程度が多く使われる。

この手法は船体表面の圧力を精度よく計測することができ、また限られた数の圧力センサで多数の点の計測ができるというメリットが有る。しかし圧力孔の工作、導圧管の設置、試験前に多数の導圧管から空気を抜き水で満たす作業等、準備面で多大な工数を要する。また、限られた数のセンサで圧力孔を切り替えながら計測するため、同時に計測できる計測点の数は限られる。

2) 圧力センサを直接埋め込む方法 (図1c)、d))

圧力センサをアダプターを介し(c)、もしくは直接(d))物体表面に埋め込む方式。センサそのものを計測点に埋め込むため、多点計測には向かない。船首尾水面近傍の衝撃圧の計測などに利用されることが多い。

1),2)の方法いずれでも、物体表面に設置する圧力孔、圧力センサの数は物理的に制限され、圧力分布の解像度には限界がある。また最大限に計測点を配置したとしても、準備・計測・解析上のコストは膨大なものになる。

これに対し風洞などでは、感圧塗料(PSP; Pressure-Sensitive Paint)を利用し、圧力変化を色の変化として捉え、画像処理により圧力の分布を連続的に計測する手法が実用化されている。PSPは酸素消光作用を受ける色素を利用した光学的酸素濃度センサであり、気体圧力と酸素濃度に相関があることを利用し圧力を計測する。

PSPを用いた圧力計測法は1990年代に研究が進められ、風洞における定常圧力計測に関わる技術はほぼ確立したと言われている。しかしながらこの手法は、流体中の酸素量を計測しているため、試験水槽で使用することは原理的に難しい。

2.3 船体表面圧力の計測例

ここでは理論計算結果(Rankine Source法)の検証のため、1992年にSRCで行なった船体表面圧力の計測例を紹介する。

船体表面圧力計測は、先行する例に倣い導圧管とスキャニバルブを用いた2.2 1)の方法で行った。圧力孔の詳細および計測系を図2に示す。船体表面に設けた圧力孔は径1mmであり、左舷側を主として両舷合わせて109箇所設置した。

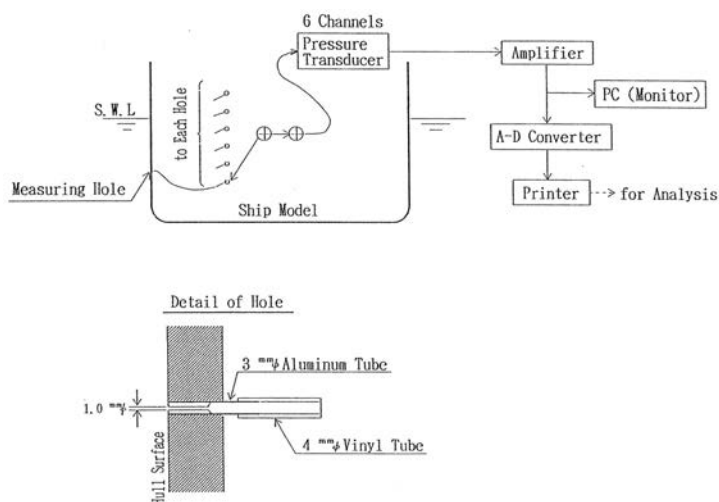


図2 船体表面圧力計測系 (SRCにおける計測例)

供試船型は、代表的な肥大船型としてSR196B船型 (M.S.No. 4420、L/B=6.00、B/d=2.76、 $C_B=0.80$) を選定した。載貨状態は

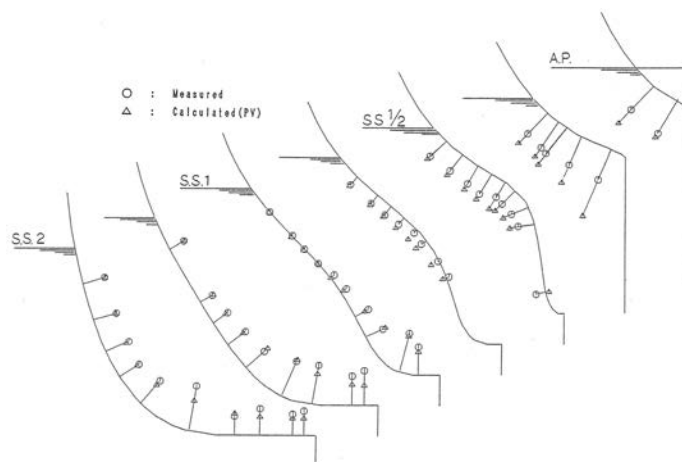


図3 圧力計測結果 (ポテンシャル流線に沿った分布)
M.S.No.4420、Full Load、 $F_n=0.1483$

満載状態、計測速度は $F_n=0.1483$ ($R_n=5.315 \times 10^5$) とした。

計測結果を図3に示す。図3は船尾の代表的なSt.において圧力計測結果と理論計算値 (Rankine Source法) を比較したものである。造波の影響が大きい水面付近では理論計算結果と圧力計測結果がよく一致している。しかしSt. 1/2より後方また船底に近くなると、境界層が発達し粘性影響が強くなりポテンシャル計算であるRankine Source法との一致度が悪くなる。

3. センサーによる 新しい船体表面圧力計測法の開発

ここまで見てきたように船体表面圧力計測は、その準備の煩雑さ、計測にかかる工数などから試験水槽で日常的に行われる試験ではない。こうした課題に対しSRCでは、(株)シミウス、大阪府立大学と協力してFBG (Fiber Bragg Gratings) を用いた船体表面貼付型多点圧力センサによる新しい計測法開発を進めている。

3.1 FBGによる歪計測の原理

FBGは光ファイバーセンシング技術の一つである。光ファイバー内を通る入射光は、光ファイバー内に設けた回折格子 (FBG) で格子間隔Lに応じた特定の波長のみ反射され、その他の波長は透過しながら伝播する。反射光の波長 λ_B を測定すれば、格子間隔Lを知ることができる。回折格子が外力により変形した場合、格子間隔はL' となり、反射光の波長も λ_B' に変化する。この波長の変化を計測することにより変形量を知ることができる。以上の原理を図4に示した。多点計測を行なう場合、反射光の波長が異なる回折格子 (格子間隔が異なる) を一本の光ファイバー上に多数配置し、各計測点からの反射光の波長変化を計測する。

以上の原理を用いて、FBGは圧力をはじめ応力、変位の計測、温度、加速度の計測などに使用されている。また電気を使用していな

いため電気、磁気等の外乱に強く、長期信頼性が高い。センサへの給電が不要というメリットもあり、都市インフラ（橋梁、交通機関、等）やエネルギー（発電所、パイプライン等）等幅広い分野でモニタリングに使用されている。

3.2 船体表面圧力計測用FBG圧力センサ

図5に船体表面圧力計測用に（株）シミウスにより開発されたFBG圧力センサを示す。このセンサは船体表面圧力計測を今までより簡易に効率よく行うことを目的に開発された。このセンサは抵抗・

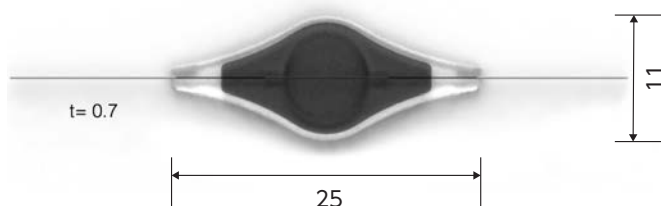


図5 FBG圧力センサ⁷⁾

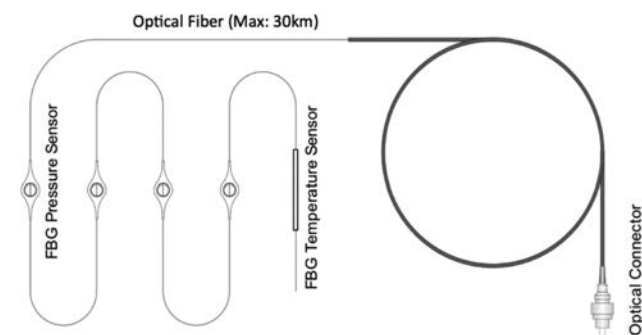


図6 FBG圧力センサの配置⁷⁾

自航試験等に使用した模型船に、特殊な工事なしで数多くの計測点を設置するため、接着工法を採用することを前提に設計されている。

光ファイバー（直径155 μ m）上のFBGゲージ長さは10mmであり、これをダイヤフラムとなる受圧面フィルムに貼り、ベース層に固定し、センサ部を構成する。厚さは船体表面に貼付することを考慮し、0.7mmと極力薄くした。

このセンサを一本の光ファイバー上に最大80点直列に配置する。センサの間隔は任意に設定可能であり、光ファイバーの全長は30kmまで延長可能である。図6にFBG圧力センサの配置例を示した。ここでは温度保証を行なうためのFBG温度センサを要所に配置している。

3.3 FBG圧力センサによる船体表面圧力計測

FBG圧力センサの性能を確認し、計測法を確立するため、曳航水槽における船体表面圧力計測を行った。試験は2008年と2013年にSRCにより海上技術安全研究所の中水槽において行われた。2008年の試験においてはFBG圧力センサの基本仕様とその性能を確認し、またFBG圧力センサを貼付したことによる船体への影響を把握した^{8),9)}。

2008年の結果を用いてセンサおよびデータ解析法の改良を行なったのが、2013年の試験である。2013年の試験では肥大船の船首尾に28点の計測点を設け、繰り返し計測を行った。計測点の設置状況を図7に示す。計測点は船体前半部に15点（Ai～Ei）船体後半部に13点（Vi～Zi）である（i=1～3）。センサは両面テープで船体表面に沿って貼り付けられ、光ファイバーもテープにより固定されている。1航走でこれら28点の圧力を同時に計測することができる。

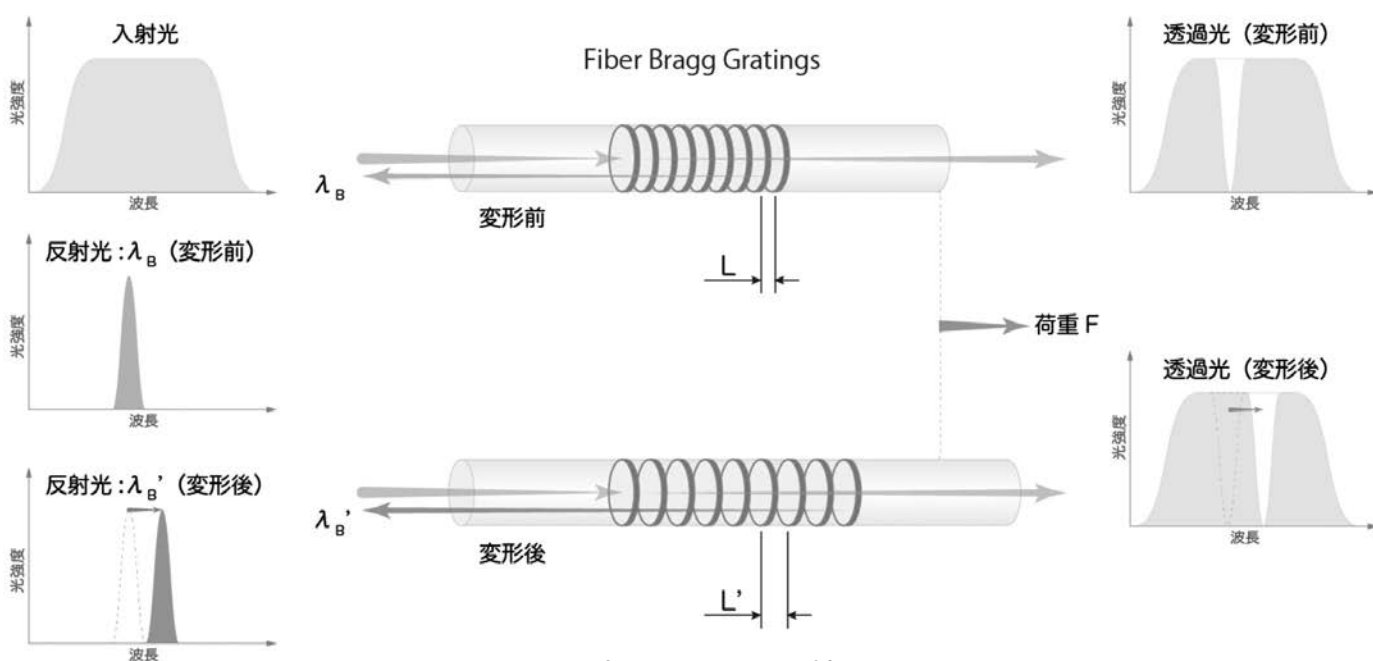


図4 FBG圧力センサーによる歪測定の原理⁷⁾

計測結果を図8に示す。5回の航走の結果得られた船体表面圧力は船首のビルジ部に相当するA3～E3の計測点のバラつきが多少大きいものの、その他はよく一致している。図中には文献5)による従来型センサーによる計測結果も併せて示したが、FBG圧力センサによる計測結果とよく一致しており、2008年の計測より改善が見られる。この計測にかかった時間はFBG圧力センサの設置から計測のための航走、センサ撤去も含め1日で完了した。センサが航走時に脱落することも無く、センサ撤去後の船体に特に大きな傷も無く、良好な状態が保たれていた。

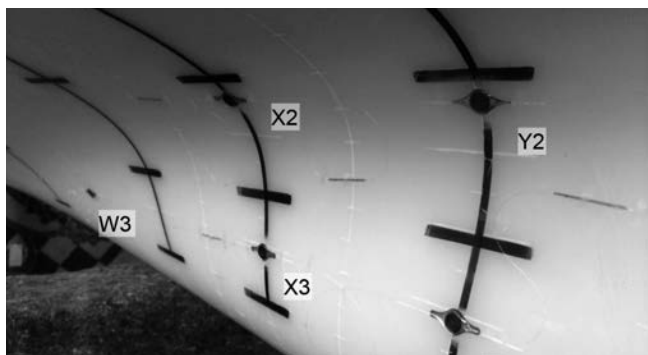


図7 FBG圧力センサの設置状況

4. 今後の課題

これまでの開発の結果、FBG圧力センサを用いた船体表面圧力の計測は、SRCが標準的に使用しているパラウード製大型模型船を用いた場合、抵抗・自航試験終了後1日程度の準備と数時間の試験時間で、船体表面圧力を計測できる見込みを得ることができた。また計測結果のバラつきも少なく、従来型センサーによる計測と比較しても良好な計測結果が得られている。ここでご紹介した例は数十点規模の計測であったが、現在最新の計測機器を使用すれば最大1280点までの同時計測が可能である。

今後、本計測手法の実用化のため以下のような課題を解決していく必要がある。

- ① FBG圧力センサの小型化、薄型化、量産型の開発
- ② FBGセンサの周辺流れ場への影響評価
- ③ 従来型圧力センサとの比較
- ④ 数百点規模の船体表面圧力計測

今後は以上の検討を通じて、FBG圧力センサを用いた船体表面圧力計測・解析法の標準化を進めるとともに、その精度の把握を行っていく。またFBG圧力センサが持つメリットを生かし、波浪中試験、プロペラ性能試験への適用、実船計測への適用など応用範囲の拡大を図って行きたい。

FBGは、従来の水槽試験で用いられていた技術とはまったく異なる原理で作動するセンサである。圧力計測に限らず、柔軟な発想を持って開発に取り組み、今まで計測できなかった現象を捉えることができる有力なツールとなると期待している。FBG技術が水槽試験のブレークスルーとなることを期待して、今後も開発に取り組んで行きたい。

(試験センター技術部 金井 健)

参考文献

- 1) 田宮：船体表面の圧力計測、造船協会誌第346号、P2-6、1958年7月
- 2) 船型開発と試験水槽、日本造船学会シンポジウムテキストP132-135、1983年2月
- 3) 船尾形状設計法(粘性流れ)に関する研究、造船研究協会第196研究部会報告書、1987年3月
- 4) Toda, et.al.: Mean Flow measurement in the Boundary Layer and Wake of a Series 60 CB=0.6 Model Ship with and Without Propeller, J. Ship Research, Vol.34, No.4, 1990
- 5) Kume et.al.: Measurement of Hydrodynamic Forces, Surface pressure and wake for obliquely towed tanker model and uncertainty analysis for CFD validation, J. of Marine Science and Technology, P.65-75, 2006
- 6) 船体周りの流れと船型開発に関するシンポジウム、日本造船学会シンポジウムテキストP219、1993年4月
- 7) (株)シミュス：パンフレットより
- 8) 若原他：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 ー、日本船舶海洋工学会論文集第7号、P1-7、2008年6月
- 9) 若原他：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 ー、日本船舶海洋工学会論文集第7号、P9-14、2008年6月

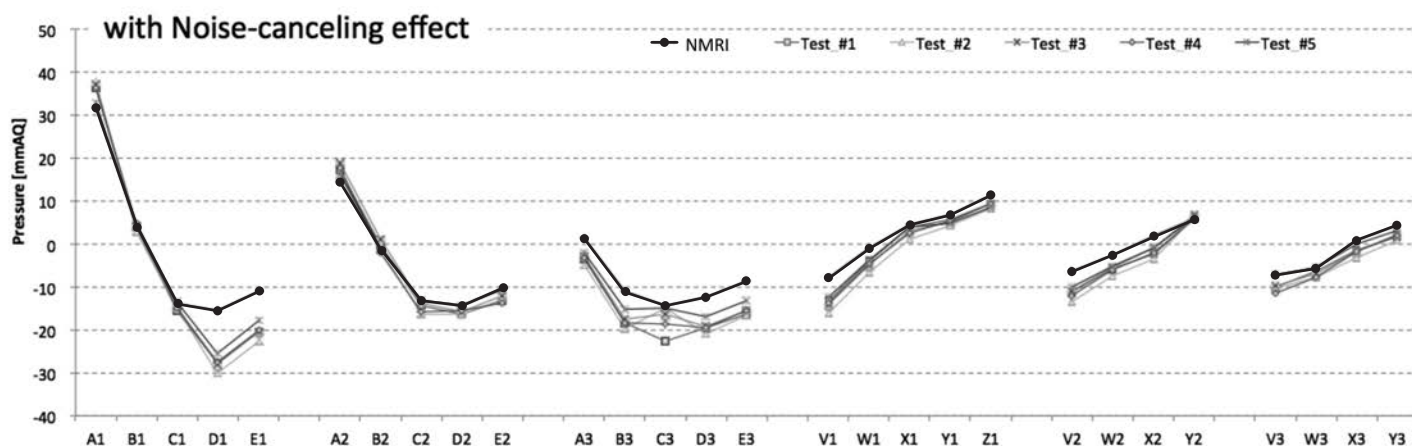
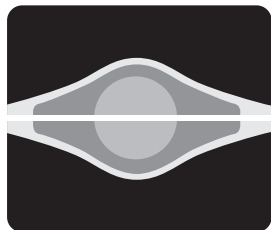


図8 船体表面圧力計測結果



FBGを用いた 表面貼付型多点圧力センサによる 船体表面圧力計測

1. はじめに

航走する船体の表面圧力計測は、推進性能と耐航性能改善のための船型改良、船体付加物の開発および船体・プロペラ・舵の相互干渉の把握に有用であると考えられています。現在主流となっている圧力計測法は、表面に歪みゲージ式圧力センサを埋め込む方法および船体表面に計測孔を設けて導圧管を用いて圧力センサに接続する方法です。しかしながらこれらの方法で多点での計測を実現するためには、その工作と試験に多大な労力を要します。それゆえに船体表面圧力計測は、造船所の設計部門において日常的に活用されるまでには至っていません。

そこで船体表面の圧力を低コストで簡便に精度良く計測することを目的として、株式会社シミウスおよび大阪府立大学と協力し、FBG (Fiber Bragg Gratings) を用いた表面貼付型多点圧力センサ (以下FBG圧力センサとする。) による船体表面圧力計測法の開発¹⁾を進めてきました。

FBG圧力センサは、光ファイバによる歪みの計測技術を圧力の計測に応用したセンサであり、これを模型船の表面に貼付し、抵抗試験状態における圧力を計測した結果は既に報告²⁾されています。この報告では、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計測の将来的な可能性が示されています。

そこで本稿では、上述の結果を発展させ、最終的に造船所における船体設計に有用なツールの1つとするために、多点圧力計測を実用的なコストと精度で実現できる計測法を紹介します。

2. 計測装置および供試船型

2.1 供試船型

表-1に供試船型の主要目を示します。供試船型は、実験と理論

計算の検証によく利用されるKVLCC2船型です。過去に行なわれた計測例³⁾と条件を合わせるために、舵、ビルジキールなどの付加物を外して裸殻状態とし、船首バルブ中央とS.S.9½の2箇所に乱流促進用の突起物を取り付けました。

表-1 供試船型の主要目等

Item	Model Ship	Actual Ship
Length between perpendiculars	5.517m	320.0m
Breadth(molded)	1.000m	58.0m
Draft(molded)	0.3586m	20.8m
Block coefficient C_b	0.8092	

2.2 FBG圧力センサ

図-1にFBG圧力センサを示します。FBG圧力センサは、直径6mmの円上にダイヤフラムとなる受圧面フィルムが貼ってあり、その面に加わる圧力を検出します。計測する物体の表面に貼付して用いるため、小型かつ薄型の形状となっています。

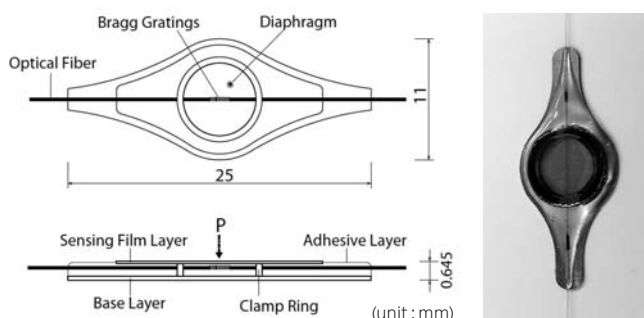


図-1 FBG圧力センサ

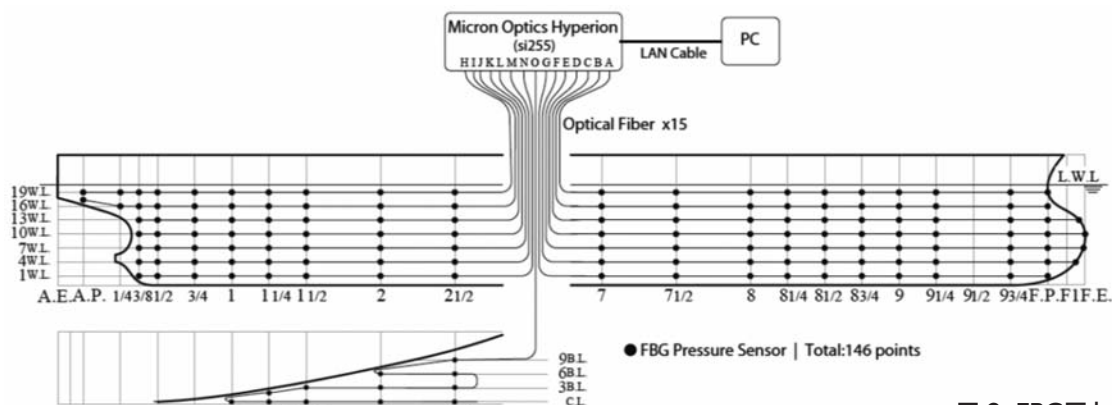


図-2 FBG圧力センサ配置図

2.3 FBG圧力センサの配置および設置方法

図-2にFBG圧力センサの配置を示します。この試験ではFBG圧力センサを146点用意し、船側のW.L.に沿って7列と船尾船底に1列配置することになりました。この計画に基づき1列につき8点から12点のFBG圧力センサを直列に接続した光ファイバを船体中央部から船首尾端それぞれに向けて配置しました。

船体への接着は、模型船の接着面の汚れをアルコールで拭取り、両面テープにより船体にFBG圧力センサを貼り付けます。これらの設置は10時間、剥離は2時間で行うことができました。

3. 6自由度拘束状態における圧力の計測

3.1 検証に使用する実験とCFD計算

FBG圧力センサを用いた手法による試験を従来の方法(導圧管を用いた方法)による計測例およびCFD計算と比較し、FBG圧力センサの精度を検証しました。比較対象には、久米らによって行われた従来の方法による計測例³⁾および西川らによって行われたCFD計算結果⁴⁾を用いました。CFD計算は、自由表面を考慮せず、喫水の平面を鏡像条件として計算しております。

3.2 本手法による結果と他の手法による結果の比較

模型船は比較対象と試験条件を合わせ、全6自由度を固定して試験を行いました。試験を実施したレイノルズ数とフルード数を既存の実験およびCFD計算とあわせて表-2に示します。

表-2 試験を実施したレイノルズ数とフルード数

	FBG test	EXP.	CFD
Reynolds No.	4.467×10 ⁶	4.280×10 ⁶ (fore)	4.600×10 ⁶
		4.440×10 ⁶ (mid)	
		4.743×10 ⁶ (aft)	
Froude No.	0.1138	0.1424	—

図-3に代表的なW.L.におけるFBG圧力センサによる計測結果、従来の手法による計測例およびCFD計算結果を比較して示します。横軸はA.P.からの距離を無次元化した値、縦軸は船速を使って無次元化した圧力係数(C_p)としました。また、図-4に代表的なS.S.における計測例の比較を示します。これらよりFBG圧力センサの計測結果は他手法と概ね良く一致していることがわかります。

19W.L.、 $x/L_{pp}=0.875$ 付近で、FBG圧力センサによる計測結果が他の2つの手法と比較して低い値を示しています。図-5に試験結果の拡大図と波形写真を示します。これによると当該付近においては、確かに水面が低下し、FBG圧力センサによる計測結果はその水面変化を捉えているように見えます。従来法による計測例

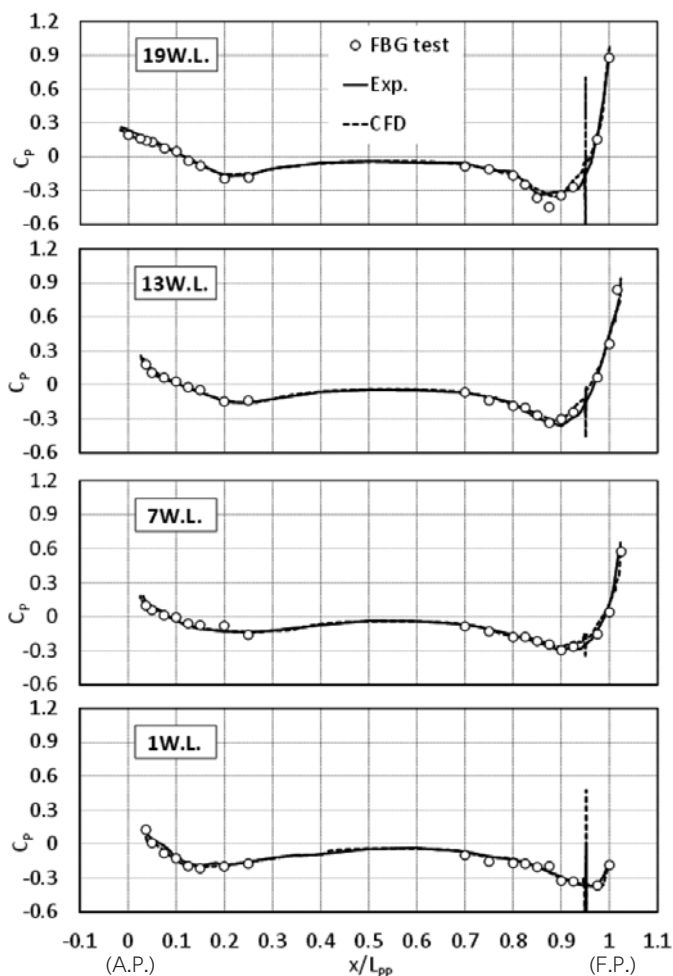


図-3 本手法による計測、従来の手法による計測例およびCFD計算の比較

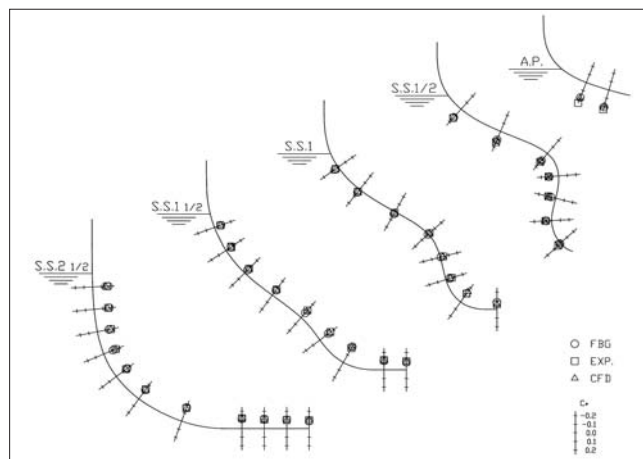


図-4 試験結果、過去の実験結果およびCFD計算結果の比較

には計測結果の補間法による影響が、またCFD計算には自由表面が考慮されていない影響などの問題が考えられます。こうしたことも含めてFBG圧力センサによる計測結果には、詳細な検討が必要です。また、船尾の圧力回復が著しい領域に厚さ約0.7mmのFBG圧力センサを貼付した影響についても、今後の課題として調査する必要があると考えています。

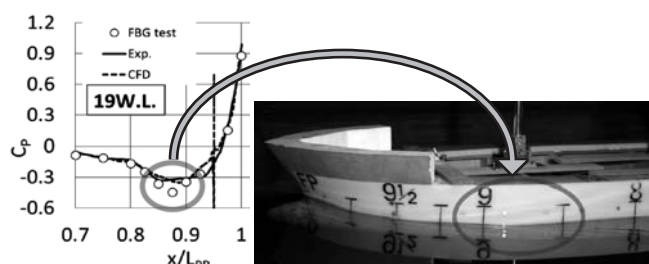


図-5 試験結果と船首付近の船側波形

4. 抵抗試験状態における圧力の計測

本計測法では、多点の圧力を1航走で計測することが可能です。その特性を生かし、フルード数の相違による圧力分布の変化を日々行われる抵抗試験状態において計測しました。

図-6に19W.L.の圧力計測結果と航走時の水位差による C_p を比較して示します。

水位差による C_p は、静止時と航走時に撮影した波形写真(図-7)より航走によって生じる水位差を読み取り、 C_p を求めました。

船側波形と圧力計測結果には高い相関があり、フルード数を

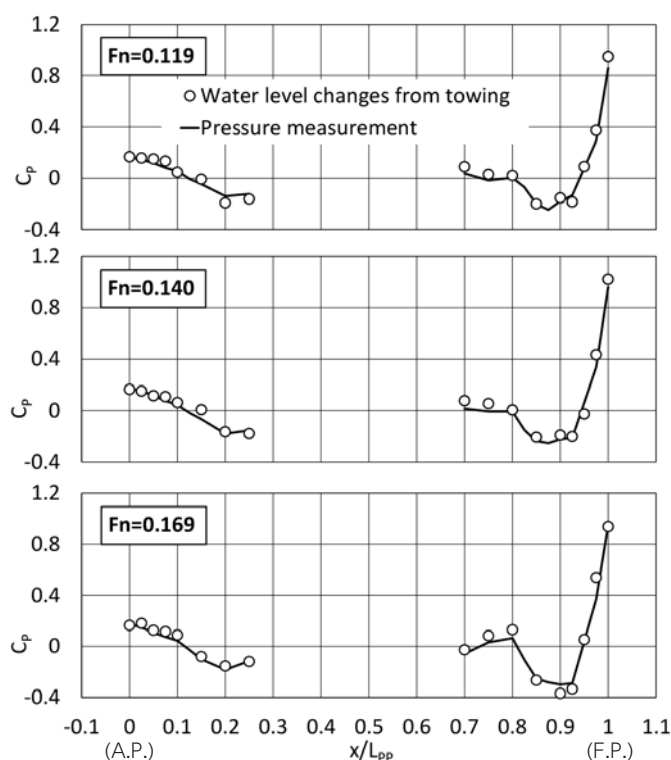


図-6 抵抗試験状態における圧力係数の比較図

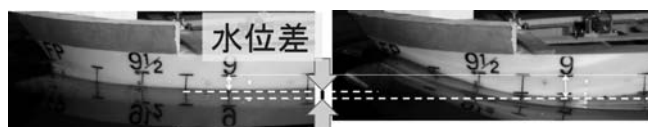


図-7 静止時と航走時の船首付近の船側波形

変更しても計測結果と C_p の相関には大きな差は生じません。これより、本計測手法によって得られる圧力計測結果は有用であり、実用面においても問題なく実施できることがわかりました。

5. まとめ

本研究では十分な圧力分布情報を得るために約150点のFBG圧力センサを貼付し、船体表面の圧力を計測しました。まとめを以下に示します。

- (1) 準備が簡便であり、1航走で全点の計測ができることを確認しました。これにより従来の方法に比べて飛躍的に試験効率が向上しました。
- (2) 従来の方法による計測例およびCFD計算と比較し、船型改良に使用可能な精度があることを確認しました。

約150点の圧力計測を行う場合の準備、計測に必要な時間を今回の方法と従来の方法で比較し表-3にまとめました。これをみても試験効率が向上していることは明らかです。

表-3 本試験法と従来の方法による所要時間等の比較

	FBG圧力センサによる方法	従来の方法 (導圧管を用いる方法)
準備に要する時間	10時間	2~3週間 (70~105時間)
全点計測に必要な走行回数	1回	通常 数回~十数回
計測後の模型船の状態	貼付前と同じ	計測孔があり、 他の試験に利用不可

今後の課題としては、FBG圧力センサの流れ場に及ぼす影響の調査、付加物まわりの圧力計測法の開発、実船計測の検討などを考えています。

今回の試験によってFBG圧力センサによる船体表面圧力計測法の実用化に目途をつけることができました。本手法を船型改良および付加物開発に対するツールの1つとして確立することを目標に、今後開発を継続したいと考えています。

参考資料

- 1) 福島寛司, 若原正人, 西川達雄, 深沢塔一, 金井健:
FBGを用いた表面貼付型多点圧力センサによる船体表面圧力計測,
日本船舶海洋工学会秋季講演会発表予定, 2015.
- 2) 若原正人, 谷上明彦, 新郷将司, 中島円, 深沢塔一, 金井健:
FBGを用いた表面貼付型多点圧力センサの開発,
日本船舶海洋工学会論文集, 第7号, pp.9-14, 2008.
- 3) K. Kume et.al : Measurement of hydrodynamic forces,
surface pressure, and wake for obliquely towed tanker model
and uncertainty analysis for CFD validation,
Journal of Marine Science and Technology, pp.65-75, 2006.
- 4) T. Nishikawa et.al :
Fully resolved large eddy simulation as an alternative
to towing tank resistance tests,
16th Numerical Towing Tank Symposium, pp.102-107, 2013.