

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01547

研究課題名(和文) 波浪中を航走する船の船体表面圧力分布の革新的計測技術および高精度理論推定法の開発

研究課題名(英文) Development of an Innovative Measurement Technology and a High-Accuracy Theoretical Estimation Method for Ship Advancing in Waves

研究代表者

岩下 英嗣 (Iwashita, Hidetsugu)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・教授

研究者番号：60223393

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：波浪中を航走する船舶の船体表面に作用する圧力を面分布として計測するため、温度干渉影響の少ないFBG圧力センサー(ver.7)を開発し、それを用いた計測法およびデータ解析技術を確立した。開発した圧力センサーを供試模型片舷に379点ほど貼り付け、正面向い波(規則波)中の色々な波長における圧力分布を計測することで、圧力センサーと計測・解析法の精度を確認している。一方、簡易結合法に基づくランキンパネル法による理論計算において定常攪乱影響を精度良く計算する手法を開発し、FBG圧力センサーにより計測された圧力分布レベルで比較することによりその有効性を確認している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

船舶を含めた輸送機器の開発や設計において、その表面の圧力分布を知ることは、流体解析を受けて行われる構造解析にも関連して究極的に重要である。これまで波浪中を航走する船舶の圧力の面分布計測は困難であったが、本研究で開発した温度干渉影響の少ないFBG圧力センサーを用いることによりそれが可能となった。これにより、計測された圧力面分布データが実用上の波浪荷重等構造設計に直接的に利用できるようになっただけでなく、学術的には数値シミュレーション等の詳細な検証用データとして活用することができるようになった。

研究成果の概要(英文)：In order to measure the pressure acting on the hull surface of a ship navigating in waves as a surface distribution, we have developed an FBG pressure sensor (ver. 7) that is less affected by temperature interference, and established a measurement method and data analysis technology using it. By attaching 379 pressure sensors we developed to one side of the ship model and measuring the pressure distribution at various wavelengths in regular head-waves, the accuracy of the pressure sensors and/or measurement/analysis method was confirmed. On the other hand, we have developed a method to accurately calculate steady disturbance effects in theoretical calculations using the Rankin panel method based on the simple combined method, and confirmed its effectiveness by comparing the pressure distribution measured by the FBG pressure sensors.

研究分野：工学

キーワード：FBG圧力センサー 非定常圧力 Added pressure 抵抗増加 ランキンパネル法

様式 C-19, F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

船舶を含めた輸送機器の開発や設計において、その表面の圧力分布を知ることは、流体解析を受けて行われる構造解析にも関連して究極的に重要である。波浪中を航走する船舶の性能、すなわち耐航性能に関する分野においては、その性能を推定する理論的な方法として、従来から用いられて来たストリップ法、細長船理論、境界要素法などのポテンシャル理論に加えて CFD(数値流体力学)を用いた手法が散見されるようになって来ていた。一方、それら手法による推定結果を検証するための EFD(実験流体力学)に関しては、船体に作用する流体力、運動の計測や、時に歪式圧力センサを用いた特定断面での圧力計測が行われているに留まっており、CFD を精緻に評価できるような圧力の面分布データの取得法の確立が切望されていた。

2. 研究の目的

上記の背景を受け、本研究では、昨今開発が進められている光センシング技術を用いた新しい圧力センサによる船体表面全域での高精度圧力計測法という革新的な EFD 手法を開発・確立することを目的とした。温度干渉影響の少ない圧力センサ(FBG 圧力センサ)の開発と、その計測精度の検証に注力している。加えて、ポテンシャル理論に基づく三次元の計算法に改良を加えて圧力場の推定精度を向上させると共に、他の既存の計算法による結果も含めて実験で得られた圧力場との比較を行うことで、各種計算法の問題点などを明らかにする。そうした計算法のベンチマークテストも目的に含めている。

3. 研究の方法

本研究は下記の 3 つの項目を設けて遂行した。

- (1) 光センシング技術の中の FBG 技術を用いた貼付型 FBG 圧力センサをメーカーと共に開発し、従来の歪式圧力センサと共に供試模型に取り付けて正面向い波中での圧力分布計測を実施する。歪式圧力センサと FBG 圧力センサの計測結果を比較することで、後者の温度干渉影響について調査し、温度干渉影響の小さいセンサの開発・改良を行う。
- (2) 最終的に開発された温度干渉影響の小さい FBG 圧力センサを供試験模型片舷に 380 点ほど貼りつけて正面向い波中での運動、圧力、船側波形、抵抗増加の計測を実施する。得られた圧力分布を船体濡れ面で積分することで流体力や抵抗増加を算出し、他の計測機器により別途計測された結果と比較することで計測圧力の精度検証を行う。
- (3) 三次元計算法の一種であるランキンパネル法に改良を加え、圧力場の高精度推定を行い、既存の各種計算法と、(2)で取得した圧力データを比較することで、既存の計算法のベンチマークテストを行う。これにより本研究で取得した圧力データの有用性を示すことにもなる。

4. 研究成果

以下、得られた研究成果を研究方法の項目ごとに示す。

(1) 温度干渉影響の小さい FBG 圧力センサの開発と計測・解析技術の構築

FBG 技術を用いた FBG 圧力センサについては、先行研究においてその基礎技術は構築していたが、温度干渉影響に起因した計測精度に関して問題が残っていた。そこで、研究期間中、毎年改良を施した圧力センサを製作し、水槽試験による計測に供して温度干渉影響の観点から性能の確認を行ってきた。図 1 は最新版の FBG 圧力センサ ver. 7 と、それを供試模型へ多数貼付した様子を



図1: FBG圧力センサと模型への貼付

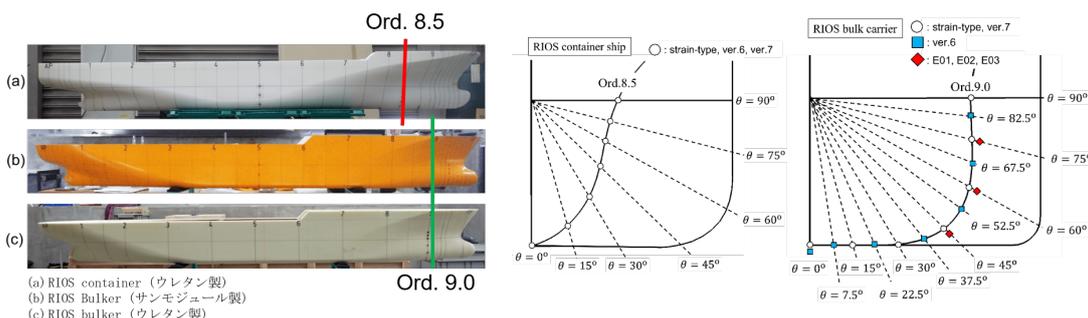


図2: 供試模型と圧力センサ貼付位置の例

示している。Ver. 7 のセンサは、従来のセンサと比べて感圧部の剛性を増してある。

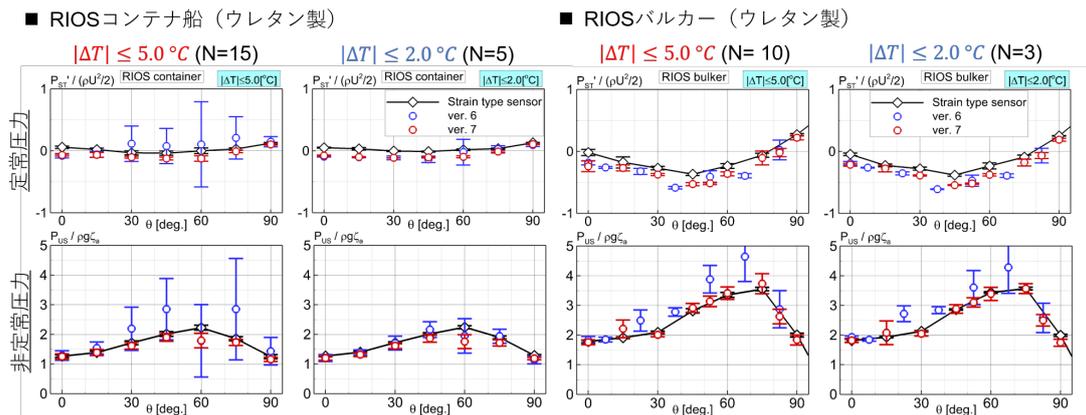


図3: 供試模型と圧力センサ貼付位置の例

図 3 はウレタン製コンテナ船およびバルカーの検査断面(図 2)における定常圧力と非定常圧力の分布を示している。温度干渉影響を小さくした圧力センサ ver. 7 が、従来の圧力センサ ver. 6 と比べて $|\Delta T|$ が 5 度以内でも計測値のばらつきが小さくなっていることが確認される (ΔT : 気温と水温の差)。この他に、サンモジュール製模型よりもウレタン製模型を使用した方がより温度干渉影響を小さくできることが明らかとなっている。FBG 圧力センサでは感温部が水のみに接しているのに対して、感圧部が両面テープを介して模型と接触しており、模型内部の気温の影響を受けるためだと考えられる。温度干渉影響を小さくして計測するためには、ver. 7 を断熱性の高いウレタン製模型表面に貼付して使用するのが良いことが分かったことになる。

(2) 計測圧力積分による流体力および抵抗増加の算出

379 個の FBG 圧力センサ ver. 7 と 19 個の歪式圧力センサを供試模型の両舷へ取り付けて、強制動揺試験、波強制力計測試験、運動・抵抗増加計測試験を実施した。

FBG 圧力センサにより船体表面上で面的に高密度に圧力が取得できるということは、CFD 同様に、得られた非定常な圧力を船

体濡れ面上で積分することにより流体力が算出できるということになる。こうして得られた流体力と、別途検力計や歪ゲージにより取得した流体力とを比較することで、圧力データの精度検証を行うことができる。図 4 は、強制 heave & pitch 試験により得られた付加質量および減衰力係数を示している。計測圧力の積分により得られたこれら流体力が検力計により計測された流体力と高精度で合致していることが確認できる。

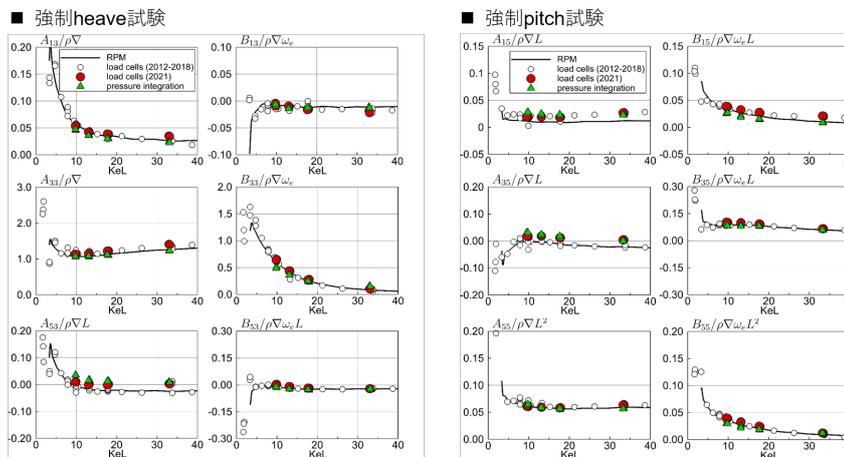


図4: 付加質量および減衰力係数

(3) ランキンパネル法の改良と各種計算法のベンチマークテスト

三次元ポテンシャル理論における耐航性能推定法の中で最も汎用性の高い方法がランキンパネル法(RPM)である。放射条件の満足させ方の違いによりいくつかの手法があるが、本研究では最も厳密に放射条件を満足させることができる方法として簡易結合法を用いた方法を開発して用いている。従前、定常流場の影響を示す m-term という干渉項の計算を、境界面を離散化したパネル内で厳密積分する方法で計算していたが、2階微分の計算については、その方法が適切でないことが判明し、これを数値微分により計算する方法へと変更した。その結果、図 5 に示すように、運動の同調点近傍でも実験結果を良好な精度で推定できるようになった。

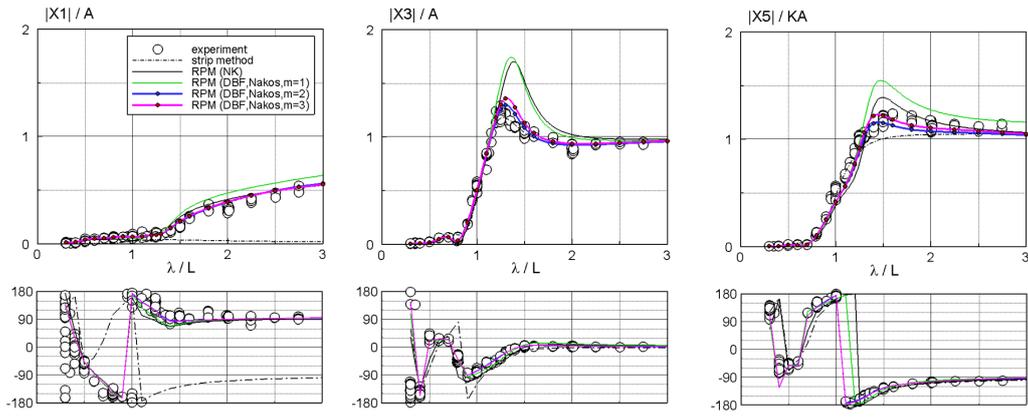


図5: m-term計算法見直しによるランキンパネル法の改良(船体運動)

図 6 に、計測した圧力分布を船体濡れ面上で積分することにより得られた抵抗増加の結果を示す。理論計算のベンチマークとして EUT (Enhanced Unified Theory) の結果も示している。図 6 の下図は抵抗増加算出の元になる added pressure の分布 ($\lambda/L=1.25$) を示している。濡れ面を、入射波や船体運動、および造波等により変動する領域(自由表面から出入りする領域)と変動しない領域に分けて積分することにより、前者の積分から抵抗を、後者の積分から推力が生じていることが明瞭になった。この知見は、これまで数値計算により予見されていたことではあるが、本研究で取得可能になった高精度な計測圧力の積分によって、その事実が検証されたことになる。こうした物理現象の解明と言う目的でも本研究により開発した計測・解析法、および計測結果は広く利用することができ、その有用性が示されたと言える。

本研究を通して、これまで船舶耐航性能分野では取得の難しかった圧力の面分布での取得が可能になった。図 6 に示された抵抗増加は計測値として微量な値であるが、それ故に計測圧力積分により算出した値のばらつきが大きい。このばらつきを小さくするためには、積分面となる時々刻々変化する濡れ面の把握、すなわち船側波形の計測精度の向上が必要であることが分かってきた。今後は、船側波形の計測精度向上を図ると共に、本手法を用いた応用として、抵抗増加を低減する船首形状の開発等に展開して行ければ良いと考えている。

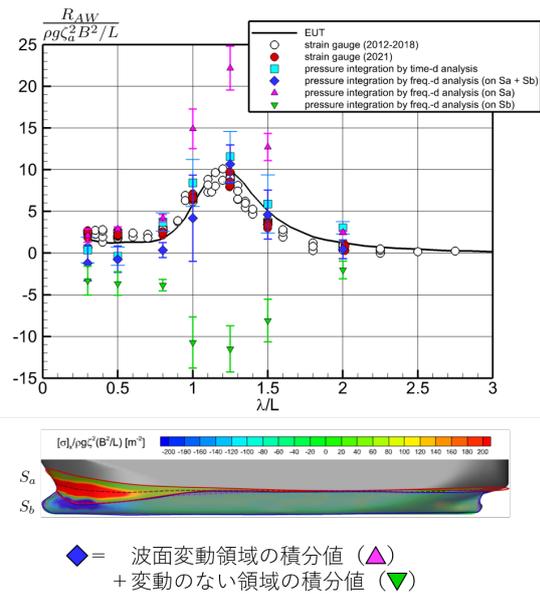


図6: 計測圧力積分による抵抗増加

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Suzuki Kantaro, Iwashita Hidetsugu, Kashiwagi Masashi, Wakahara Masahito, Iida Takahito, Minoura Munehiko	4. 巻 -
2. 論文標題 An innovative EFD using FBG pressure sensors for ship seakeeping	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00773-024-00986-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Suzuki, K., Iwashita, H., Kashiwagi, M., Wakahara, M., Iida, T., Minoura M.	4. 巻 28
2. 論文標題 Temperature Interference in Improved FBG Pressure Sensor for Towing Tank Test	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00773-023-00925-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Suzuki Kantaro, Iida Takahito, Iwashita Hidetsugu, Minoura Munehiko	4. 巻 34
2. 論文標題 Prediction of Unsteady Pressure Distribution in Irregular Waves Using Locally Measured Pressure Data and Convolution Integral	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Offshore and Polar Engineering	6. 最初と最後の頁 37 ~ 46
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.17736/ijope.2024.su02	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 鈴木寛太郎, 岩下 英嗣, 飯田 隆人, 柏木 正, 若原 正人, 箕浦 宗彦
2. 発表標題 多点計測による船体表面圧力分布を用いた流体力の算出 - 第1報：線形流体力 -
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第35号
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木寛太郎, 岩下 英嗣, 飯田 隆人, 柏木 正, 若原 正人, 箕浦 宗彦
2. 発表標題 多点計測による船体表面圧力分布を用いた流体力の算出 - 第2 報: 波浪中抵抗増加 -
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第35 号
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yamazaki, H., Iwashita, H., Aoki, K., Konom Y. Nakatani, S.
2. 発表標題 Ship-Side Wave Measurement of a Ship Advancing in Waves by High-Speed Cameras
3. 学会等名 Workshop on Environmental Technologies in Naval Architecture and Ocean Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kantaro Suzuki, Takahito Iida, Hidetsugu Iwashita, Munehiko Minoura
2. 発表標題 Prediction of Unsteady Pressure Distribution in IrregularWaves Using Locally Measured Pressure Data and Convolution Integral
3. 学会等名 ISOPE 2023 Ottawa Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木寛太郎, 箕浦宗彦, 飯田隆人, 岩下英嗣, 花木孝明
2. 発表標題 不規則波中ディフラクション問題における船体表面非定常圧力分布の再現
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会講演会論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木寛太郎, 岩下英嗣, 柏木正, 若原正人, 飯田隆人, 箕浦宗彦
2. 発表標題 FBG圧力センサの温度干渉影響について
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会令和3年秋季講演
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Suzuki, K., Iida, T., Iwashita, H., Minoura, M.
2. 発表標題 Estimation of Unsteady Pressure Distribution on Ship Hull Surface in Diffraction Problem by Using Pressure Data Measured at One Position
3. 学会等名 The 32nd International Ocean and Polar Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yang K.K., Kim B.S., Kim Y., Kashiwagi M., Iwashita H
2. 発表標題 Numerical analysis of wave-induced unsteady pressure on ship-hull surface
3. 学会等名 The 36th IWWWFB (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Suzuki K., Kashiwagi M., Iwashita H.
2. 発表標題 Effects of Homogeneous Solution in Enhanced Unified Theory on Pressure Computation around Ship Bow
3. 学会等名 Conference Proc. the 31st International Ocean and Polar Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木寛太郎, 岩下英嗣, 柏木正, 若原正人, 飯田隆人, 箕浦宗彦
2. 発表標題 FBG圧力センサの温度干渉影響について
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第33号
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Yamazaki, Hidetsugu Iwashita, Keigo Okazaki, Takahiro Tsuchimoto
2. 発表標題 Unsteady Ship-Side Wave Measurement of a Ship Advancing in Waves by Image Analysis
3. 学会等名 Workshop on Environmental Technologies in Naval Architecture and Ocean Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関