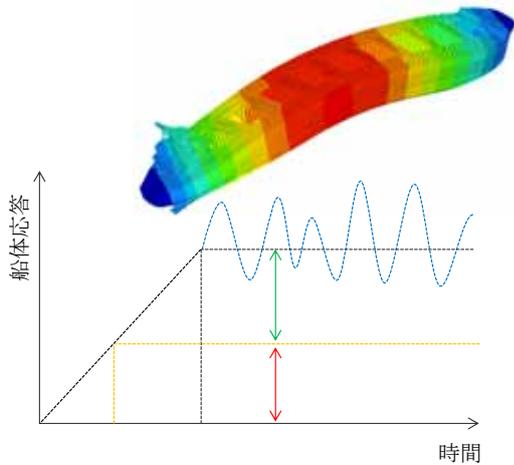


# 静水中船体応答の推定手法の比較

## Comparison of Estimation Method of Ship Response in Still Water



技術研究所 構造研究 G

河尻 義貴

YOSHITAKA Kawajiri

### 概 要

実海域での船体応答の絶対値を正しく評価するためには、波浪中船体応答だけでなく、静水中船体応答も高精度に推定する必要がある。通常、静水中船体応答はトリム計算の結果を元に推定されるが、実運航時の積付状態はトリム計算時に想定する積付状態と必ずしも一致するとは限らない。本稿では、実運航時の積付状態が未知な場合でも静水中船体応答を高精度に推定することを目的として、実船モニタリングデータとトリム計算や FEM 解析を併用した推定手法を提案する。また、提案手法の妥当性検証の結果についても解説する。

### 1. 緒 言

船舶の運航支援・保守管理等を高精度に実施するためには、それらの根幹技術として、実海域における船体応答の絶対値を高精度に推定する必要がある。実海域における船体応答の絶対値は、図 1 の模式図に示すように、静水中船体応答と波浪中船体応答の和から評価することができる。このうち波浪中船体応答については、実船モニタリングと数値シミュレーションを駆使した推定精度向上のための研究開発が進められている。

一方で、静水中船体応答は積付状態が明確であればトリム計算や FEM 解析の結果から概ね正確に推定可能であるが、実運航時の積付状態がトリム計算時に想定する積付状態と必ずしも一致するとは限らず、推定結果の妥当性について十分な検証がなされていないのが現状である。しかしながら、船体構造設計においては、静水中船体応答も含めた船体応答の絶対値が強度要件（降伏・座屈）を満足するように部材配置・材質・寸法が決定される。また、疲労強度評価においては、平均応力の影響を考慮する上で静水中船体応答を

正しく評価することは極めて重要である。

本稿では、実船モニタリングを行う船舶を対象に、実運航時の積付状態が未知な場合でも静水中船体応答を高精度に推定することを目的として、モニタリングデータとトリム計算や FEM 解析を併用した推定手法を提案する。また、トリム計算や FEM 解析のみを用いた従来の推定手法との比較による提案手法の妥当性検証の結果についても解説する。

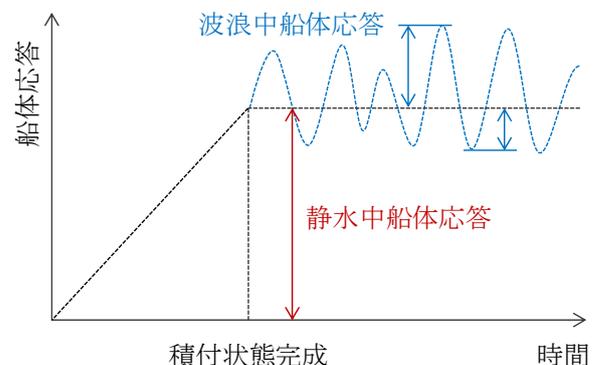


図 1 船体応答成分

Fig.1 Component of hull response.

## 2. 実船モニタリングによる静水中船体応答推定手法

実船モニタリングを行う船舶を対象に、静水中船体応答を以下の 2 つの成分の和から推定する方法を提案する。各成分の関係は図 2 の模式図に示す通りである。

- ① センサーゼロセット時の船体応答成分
- ② センサーゼロセット後の静水成分

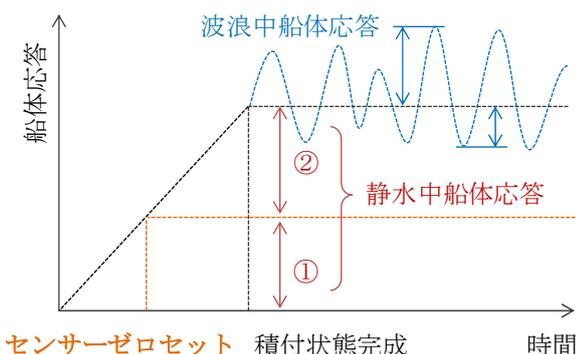


図 2 実船モニタリング時の船体応答成分  
Fig.2 Component of hull response during hull monitoring.

通常、実船モニタリングの各種センサー（ひずみ、加速度）は船体に設置後、一度同時にゼロセットされる。センサーゼロセット時の積付状態を把握することで、トリム計算や FEM 解析の結果から成分①を概ね正確に推定可能である。その後、実運航時の積付状態が完成した際の静水中船体応答のうち、成分①からの相対値を成分②とする。成分②は実運航中のモニタリングデータの平均値から推定可能である。

上記の方法により、実運航時の航海毎の積付状態を把握せずとも、センサーゼロセット時の積付状態のみを正しく把握することで、静水中船体応答を高精度に推定可能であると考えられる。

## 3. センサーゼロセット時の船体応答成分の推定手法の比較検証

先述の通り、静水中船体応答の成分①は、センサーゼロセット時の積付状態におけるトリム計算や FEM 解析の結果から概ね正確に推定可能である。ただし、厳密には日照による船体の温度差で生じる熱撓みや、船体変形 (Sag / Hog) による浮力分布の変化といった影響が考慮されていない。

そこで、トリム計算や FEM 解析による成分①の推定精度の確認を目的として、ある積付状態における船

体の縦曲げ変形に関して、トリム計算や FEM 解析による推定結果と実船の船体変形計測結果の比較検証を実施し、両者の差の要因について検討した。

### 3.1 供試船及び検証条件

供試船は当社の津事業所で建造された 20 万トン型ばら積み貨物船とした。供試船の主要目を表 1 に示す。なお、船体変形計測は供試船が岸壁に係留された状態で実施し、その時の積付状態におけるトリム計算や FEM 解析の結果から船体の縦曲げ変形を推定した。

表 1 供試船の主要目  
Table 1 Principal particulars of subject ship.

全長	299.99 m
型幅	50.00 m
型深	25.00 m
喫水	16.10 m
軽荷重量	210,890 t

### 3.2 トリム計算による推定

トリム計算結果から得られた縦曲げモーメント分布をもとに、両端単純支持の梁理論に基づいて船体の縦曲げ変形を計算した。計算結果については 3.6 で述べる。

### 3.3 FEM 解析による推定

荷重構造一貫解析ソフト DLSA<sup>2)</sup>を使用して、全船 FEM モデルに静水中の内外圧を負荷し、FEM 解析を実施し、船体変形を出力した。解析結果として、変形図と高さ方向の変位分布を図 3 に示す。

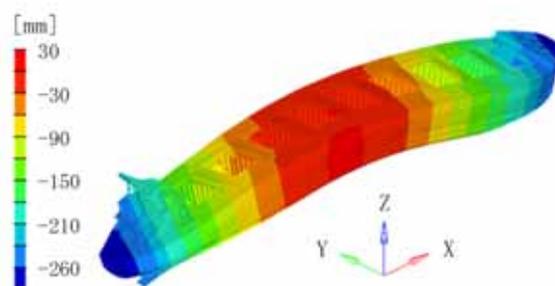


図 3 FEM 解析結果 (Z 方向の変位分布)  
Fig.3 FEM result (Displacement of z-coordinate).

### 3.4 船体変形計測

3 次元計測システム MONMOS (Mono Mobile 3D-

Station) による船体変形計測を実施した。計測機には図 4 に示す SOKKIA 製 3D Station NET-AX II を使用した。計測点に目印となるマーカーを設置し、計測機からマーカーへ向かって小径のレーザースポットを照射することで計測点の基準点からの相対位置を計測した。計測点は図 5 に示すようにデッキ上の両舷で計 10 点ずつとした。両舷のそれぞれで船尾側と船首側の 2 点を結ぶ直線を基準として、途中 8 つの計測点の相対的な高さ位置を計測した。



図 4 3次元計測システム MONMOS  
Fig.4 3D coordinate measuring system MONMOS.

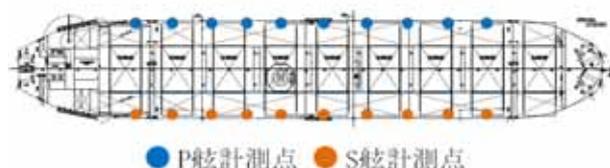


図 5 船体変形計測点の位置  
Fig.5 Measuring points of hull girder bending deformation.

### 3.5 船体温度計測

船体変形計測を実施した時間帯が日中であったため、計測結果には船体の温度差による熱撓みの影響が含まれると考えられる。そこで、船体の温度計測も実施した。温度計測位置は図 6 に示す通りである。温度計測の結果、船体変形計測時のデッキ上と二重底内の平均温度はそれぞれ  $45.1^{\circ}\text{C}$  と  $25.8^{\circ}\text{C}$  であり、両者に  $19.3^{\circ}\text{C}$  の温度差があることを確認した。

温度計測の結果から、船体を一本の梁と仮定した熱撓み<sup>3)</sup>を理論的に算出した。その際、横断面内はデッキから二重底まで高さ方向に線形の温度分布を仮定した。また、横方向、前後方向の温度分布は同一平面内で一定とし、横断面は熱変形後も平面を保持すると仮定した。

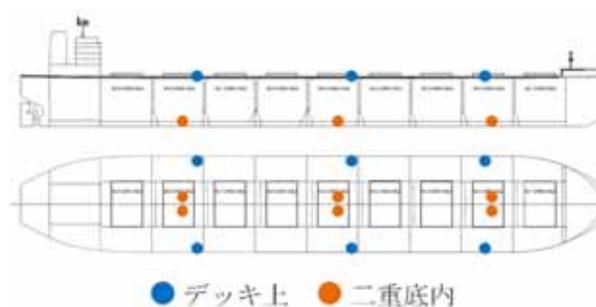


図 6 温度計測位置  
Fig.6 Measuring points of hull temperature.

### 3.6 縦曲げ変形の比較

船体の縦曲げ変形について、トリム計算に基づく梁計算結果、FEM 解析結果、船体変形計測結果の比較を図 7 に示す。同図より、梁計算結果と FEM 解析結果は概ね一致していることが分かる。対して、緑色の実線で示す船体変形計測結果は、変形の最大値が梁計算結果や FEM 解析結果よりわずかに大きい。この差は主に、日中に計測を行ったことによる船体の熱撓みの影響であると考えられる。

そこで、船体温度差による熱撓みを 3.5 の方法で試算し、船体変形計測結果から差し引いた。その結果を同図内の緑色の点線で示す。これより、日中の船体の温度差による熱撓みの影響は約 25% と非常に大きいことが分かる。通常、トリム計算や FEM 解析ではこのような熱撓みの影響は考慮されないため、日中にセンサーをゼロセットする場合、静水中船体応答の成分①を高精度に評価するにあたり無視できない要素であると考えられる。

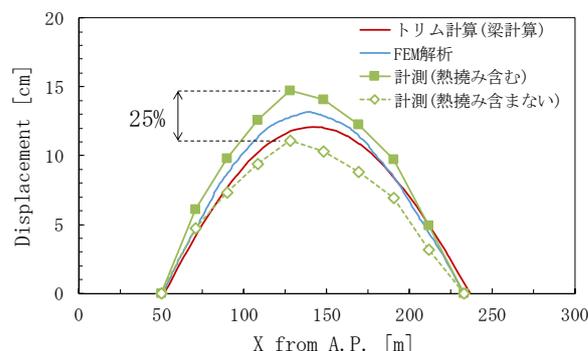


図 7 縦曲げ変形推定結果と計測結果の比較  
Fig.7 Comparison of hull girder bending deformation.

また、異なる積付状態において、船体温度差の小さい早朝に船体変形計測を実施した。船体の縦曲げ変形の比較を図 8 に示す。同図より、梁計算結果、FEM 解析結果、船体変形計測結果は概ね一致しており、早朝の場合は熱撓みの影響も極めて小さいことが分かる。

したがって、船体温度差の小さい夜間や早朝にセンサーゼロセットを行うことで、熱撓みの影響を考慮していないトリム計算や FEM 解析の結果からでも、船体変形計測と同等の精度で静水中船体応答の成分①を推定可能であると考えられる。

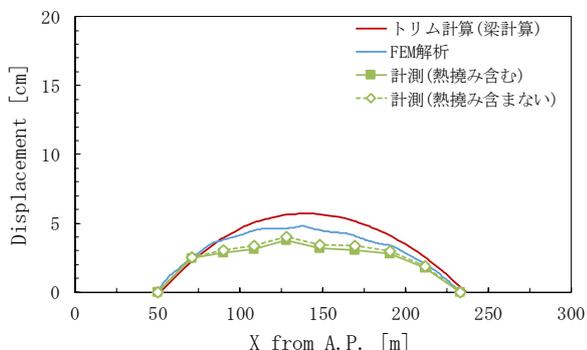


図8 縦曲げ変形推定結果と計測結果の比較  
Fig.8 Comparison of hull girder bending deformation.

#### 4. 提案手法の妥当性検証

最後に、静水中船体応答について、図9に示すように従来手法と提案手法による推定結果の比較検証を実施した。供試船は先と同じ20万トン型ばら積貨物船とし、海上試運転時における静水中のデッキ応力（船長方向応力）を評価対象とした。

従来手法では、海上試運転時の積付状態におけるトリム計算または FEM 解析の結果から、静水中のデッキ応力を推定した。対して提案手法では、センサーゼロセット時の積付状態におけるトリム計算または FEM 解析の結果から推定した成分①と、海上試運転中のモニタリングデータの平均値から推定した成分②の和から静水中のデッキ応力を推定した。

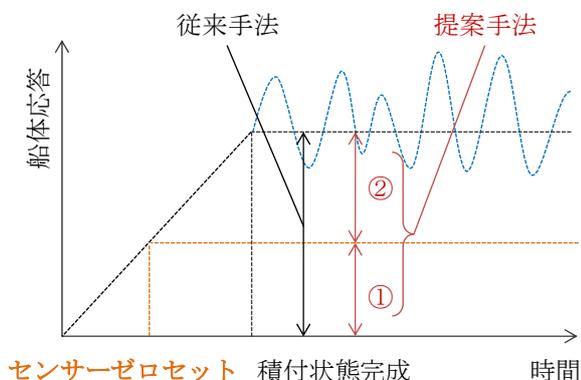


図9 静水中船体応答推定手法の比較  
Fig.9 Comparison of evaluation method of ship response in still water.

#### 4.1 提案手法におけるデッキ応力の推定

提案手法ではまず、本船が岸壁に係留された状態でモニタリングセンサーをゼロセットした。なお、船体温度差による熱影響をなるべく小さくするために、ゼロセットは早朝に実施した。そして、その時の積付状態を把握し、トリム計算と FEM 解析のそれぞれで成分①にあたるデッキ応力を推定した。

次に、海上試運転中のモニタリングデータ（ひずみ）の平均値から成分②にあたるデッキ応力を推定した。なお、モニタリングデータについても日照による熱影響をなるべく小さくするために、夜間のデータの平均値を使用した。そして、成分①と成分②の和から、静水中のデッキ応力を推定した。

#### 4.2 推定結果の比較検証

従来手法と提案手法で推定した静水中のデッキ応力の比較を図10に示す。同図において、青色の○印と□印はそれぞれ従来手法でトリム計算と FEM 解析を用いた場合の推定結果を示す。また、赤色の○印と□印は提案手法で成分①の推定にトリム計算と FEM 解析を用いた場合の結果を示す。

同図より、船体中央部の No.5 CH 付近と船尾側の No.8 CH 付近では従来手法と提案手法の推定結果が良好に一致しているが、船首側の No.2 CH 付近では両者の推定結果にばらつきが見られた。この原因として、トリム計算と FEM 解析では浮上時の船体変形（Hog/Sag）に伴う浮力分布の変化による影響を考慮していないことが考えられる。また、トリム計算では船体を剛体と仮定していることもばらつきの原因と考えられる。今後は、就航後のモニタリングデータを用いた追加検討も実施する所存である。

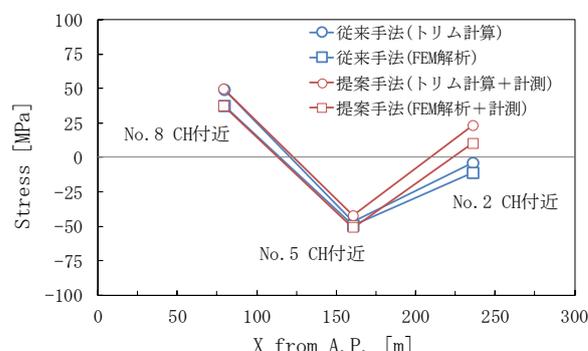


図10 デッキ応力の推定結果の比較  
Fig.10 Comparison of estimation results of stress on upper deck.

## 5. 結言

実船モニタリングを行う船舶を対象に、実運航時の積付状態が未知な場合でも静水中船体応答を高精度に推定することを目的として、モニタリングデータとトリム計算や FEM 解析を併用した静水中船体応答の推定手法を提案した。また、従来手法との比較による提案手法の妥当性検証を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 岸壁係留時の船体の縦曲げ変形をトリム計算と FEM 解析の結果から推定し、船体変形計測結果と比較した。その結果、船体温度差の小さい早朝に計測を行った場合、推定結果と計測結果は良好に一致するが、日中に計測を行った場合、船体温度差による熱撓みは計測結果の約 25%にもなり、無視できないほど影響が大きいことを確認した。
- (2) 海上試運転時における静水中のデッキ応力について、従来手法と提案手法による推定結果の比較検証を行った結果、船体中央部や船尾側では両者が概ね良好に一致するが、船首側ではばらつきが大きいことを確認した。今後は、就航後のモニタリングデータを用いた追加検討が必要であると考えられる。

## 6. 参考文献

- 1) 平川真一, 吉田智美, 岡田哲男, 辰巳晃, 内田響, 陳曦, 関紀明, 河尻義貴: ケープサイズばら積み貨物船の静水中・波浪中応答評価、日本船舶海洋工学会講演論文集、Vol.34、(2022)
- 2) 松井貞興, 村上睦尚, 林原仁志, 笛木隆太郎: 船体構造設計のための全船荷重構造解析ならびに強度評価システム DLSA-Basic の開発、海上技術安全研究所報告、第 19 巻第 3 号 (令和元年度) 研究報告、(2019)
- 3) 寺澤一雄: 船体構造力学、海文堂、pp468-470、(1974)



河尻 義貴