船体の撓みに関する研究 —汐路丸による基礎実験—

片山 泰介*・庄司 邦昭**

On the Deflection of Ship's Hull —Fundamental Experiment on T.S. Shioji Maru—

Taisuke KATAYAMA and Kuniaki SHOJI

Abstract

The ship deflection causes various troubles, especially many ship equipments are bad influenced by it. Authors made a report of the experiment using a model of “SHIOJIMARU No.III” about ship deflection. They used the strain gauge and laser displacement meter to measure the deflection.

As a result of the experiment, they could grasp the distribution of ship deflection about “SHIOJIMARU No.III” and get the data for ship design on the deflection. The real ship deflection was different from the value they estimated using a model ship.

1. 緒 言

船体に生ずる撓みについては、それ自体が船の強度上特に問題視される事がないため、従来あまり議論の対象となることはなかった。しかし、撓みが過大となると、満載時撓みがサギングになる船では満載喫水は船体中央の満載喫水線で規制されるため載荷重量を減少させることになるほか、主機及び軸系に悪影響を与え、艤装品の取り付けに支障を与え、上部構造物端部の損傷を増加させるなどの障害が考えられる。また最近、大型浮体構造物の撓みに関する問題がクローズアップされてきている。一方、これらの測定技術としてレーザ等を利用した精度の高い測位計が簡単に入手できるようになってきた。そこで、本研究では、東京商船大学付属練習船「汐路丸Ⅲ世」の模型を使い測定した歪みから撓み角を算出するとともに、レーザ測位計を使って模型船の撓みを直接求め、両者の比較及び、船体の撓み分布の検討を行った。また、実船にもレーザ測位計を搭載し、撓みの計測を行った。

2. 模型実験

2.1 弾性体モデル

実験に使用した模型船は、東京商船大学付属練習船汐路丸（Ⅲ世）の1.5m模型（1/30.67）で、これは図1に示すように船体中央から $\pm 0.13L_s$ 、 $\pm 0.26L_s$ の5カ所で6分割されている（ L_s =垂線間長）。船体軽量化のため乾舷の74%がアクリル製のほか、主要部分は木製である。模型船と実船の剛性を合わせるために、各分割面に2個ずつ取り付けられたアルミ製の接続材（以後、弾性体モデルと呼ぶ）の厚さを調整した（図2、3）。船体は進水時において既に初期撓みを持っており、これは船体の自重と浮力の部分的なアンバランスによって生じる静的な曲げモーメントに起因するものである。一般に、船体のある断面が、静的曲げモーメントMにより撓んだとき、その撓みの曲率半径をRとすると、

* 正会員 防衛庁技術研究本部（〒153 東京都目黒区中目黒2-2-1）

**正会員 東京商船大学（〒135 東京都江東区越中島2-1-6）

$$\frac{1}{R} = \frac{M}{E \times I} \dots\dots\dots(1)$$

なる式が成立する。ここでEはその断面の部材のヤング率、Iは断面二次モーメントを示す。模型船の縮尺が1/30.67であるから、実船と模型船の曲率半径にもこの縮尺が当てはまるとすれば模型船の各断面の断面二次モーメント I_M は、次のようになる。

$$I_M = \frac{M_M}{M_S} \times \frac{1}{30.67} \times \frac{E_S}{E_M} \times I_S \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 M_M 、 M_S はそれぞれ模型船と実船の静的曲げモーメント、 E_S は実船（鋼材）のヤング率、 E_M は模型船（アルミ）のヤング率、 I_S は実船の断面二次モーメントを示す。この I_S に、縦強度計算書に記載されている模型船の各断面の位置に相当する実船の断面二次モーメントの値を代入すれば、 I_M が計算できる（表1参照）。また、使用する弾性体モデルの断面形状は長方形であるので、

$$I_M = \frac{b \times H^3}{12} \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 $b=20\text{mm}$ （図2参照）。従って、(3)式により弾性体モデルの厚さHを決定できる。以上により算出した弾性体モデルを“太いタイプ”と呼ぶ。ここで剛性の違いによる撓みの変化を検討するため、厚さを半分にすることで断面二次モーメントを八分の一にした“細いタイプ”も作成した。結果として弾性体モデルを細、太2タイプを、それぞれ5分割断面において接続し実験を行った（表2参照）。この弾性体モデルにそれぞれ箔ストレーンゲージを貼り歪みを計測し、弾性方程式により各分割面に生じる撓み角を算出するとともにV、VIパートに生じる撓みそのものを、レーザ測位計を使い測定し同様に弾

図1 汐路丸III世1.5m分割模型（縮尺1/30.67）

図2 弾性体モデル

図3 弾性体モデル配置図

表1 実船と模型船の曲げモーメント及び断面二次モーメント

	実船		模型船	
	曲げモーメント $M_S (\text{t} \cdot \text{m})$	断面二次モーメント $I_S (\text{m}^4)$	曲げモーメント $M_M (\text{kg} \cdot \text{m})$	断面二次モーメント $I_M (\text{m}^4)$
A断面	497.847	0.3841	0.0621	4.56×10^{-9}
B断面	672.986	0.5113	0.1406	10.20×10^{-9}
C断面	701.596	0.7072	0.2192	21.00×10^{-9}
D断面	615.449	0.5666	0.1778	15.60×10^{-9}
E断面	401.817	0.4067	0.0710	6.84×10^{-9}

性方程式により撓み角に変換した（以上文献(1)、(2)参考）。

2.2 実験条件

実験の種類は、次のとおり。

- (1) 静止時平水中歪み計測試験
初期撓みの測定。ストレインゲージにより歪みを測定。
- (2) 航走時平水中歪み計測試験
平水中を航走した時のストレインゲージによる歪み及びレーザ測位計による撓みの測定。
- (3) 航走時正面規則波中歪み計測試験
正面規則波中を航走した時のストレインゲージによる歪み及びレーザ測位計による撓みの測定。
- (4) 静止的正面規則波中歪み計測試験
模型船を停止させ正面規則波を受けたときのストレインゲージによる歪みの測定（ただし弾性体モデルの太いタイプのみ）。

船速は、0.6m/s（実船約6ノット）、0.9m/s（実船約10ノット）、1.2m/s（実船約13ノット）、波高は、16.3mm（実船0.5m）、32.6mm（実船1.0m）、周期は、各船速に対し出合いで0.9秒（実船5秒）と、一定の1.02秒（実船5.66秒）で実験を行った。ただし、レーザ測位計は、弾性体モデルの細いタイプについて航走時平水中と、航走時正面規則波中（周期1.02秒、波高16.3mmと32.6mm）のみ撓みの測定を行った。

2.3 実験結果

汐路丸の場合、図4に示すとおり、静止時平水中の初期撓み α が最も大きくホギング方向に生じている。航走させると、撓み角はサギング方向に生じ、静止時から見た絶対値としては減少したことになる。しかし、実際の船舶の撓みを論ずる場合、航行することによって新たに生ずる撓みの方が、

初期撓みよりも重要であると考えられるので、静止時平水中をゼロとして、 β あるいは $\beta + \gamma/2$ を中心に検討を進めた。図5、6は横軸に各断面の位置、縦軸に航走時（平水中）の β の値を示したものである（図5：モデル太いタイプ、図6：モデル細いタイプ）。船速が上がるにつれ、各断面とも β の値が大きくなっているが、特にE断面の上昇率が大きい事がわかる。これは、船首部における撓みが航走の影響を強く受けるためと考えられる。一方、図7は同波高(32.6mm)の波を、波長を変えて、静止した模型船にあてた時の $\beta + \gamma/2$ の値だが、この時はE断面（すなわち船首部）に撓みの上昇は見られず、むしろA断面（すなわち船尾部）の上昇が際立っている。これは、ピッチングの中心が船体中央より後方にあるため、船尾部が船首部に比して揺れが小さい分、加わる曲げモーメントが大きくなるためと考えられる。図6の△、□、○は、それぞれ0.6m/s、0.9m/s、1.2m/sで航走したときの、レーザ測位計で測定した撓みから得られたE断面における撓み角を示しており、各速度とも歪みから求めた値とほぼ一致している。また、図8は、周期と波高を変化させた波浪中を、1.2m/sで航走させたときの $\beta + \gamma/2$ （度）を示したものである。図中の△は平水中、○は周期1.02秒で波高16.3mm、◎は周期1.02秒で波高32.6mmの波浪中におけるレーザ測位計によって得られた撓み角を示している。ばらつきはあるが、こちらも歪みによる値とほぼ一致してい

表2 弾性体モデルの厚さ

	モデルの厚さH(mm) (太いタイプ)	モデルの厚さH/2(mm) (細いタイプ)
A断面	11.1	5.55
B断面	14.5	7.25
C断面	18.5	9.25
D断面	16.7	8.35
E断面	12.7	6.35

α : 初期撓み角

β : 航走により生じる撓み角

γ : 波浪中で変化する撓み角

図4 データ概要

航走時(平水中)

図5 航走時(平水中)各分割面における撓み角(太)

航走時(平水中)

図6 航走時(平水中)各分割面における撓み角(細)

静止時(正面規則波中)

図7 波受け時(船速0)各分割面における撓み角(太)

航走時(1.2m/s)

図8 航走時(1.2m/s)各分割面における撓み角(細)

る。平水中、波浪中ともグラフの形にほとんど変化は見られない。このことは、速度を変えても太さを変えても同様である。次に視点を変えて、分割された各パートから別のパートを見たときの相対角度について検討してみる。図9 (0.6m/s)、図11 (1.2m/s) は横軸に各パート、縦軸にIパートから残りのパートを見たときの各パートの相対角度を示したものである。従ってIIパートは断面Aの $\beta + \gamma/2$ の値であり、VIパートは各断面の $\beta + \gamma/2$ の値をすべて積算した値となる。図10 (0.6m/s)、図12 (1.2m/s) は同様にIVパートから見たときの値である。この様に見ることで、船体の相対角度に配慮が必要な機装品(海上自衛隊の艦艇の機装品など)の搭載位置の検討が可能となる。速度が0.6m/sの時、撓み角のほとんどは波

航走時 (0.6m/s)

図9 航走時(0.6m/s) Iパートから見た積算撓み角(細)

航走時 (0.6m/s)

図10 航走時(0.6m/s)IVパートから見た積算撓み角(細)

航走時 (1.2m/s)

図11 航走時(1.2m/s) Iパートから見た積算撓み角(細)

航走時 (1.2m/s)

図12 航走時(1.2m/s)IVパートから見た積算撓み角(細)

による影響が支配的なのに対し(平水中の値が波のあるときに比して小さい)、速度が1.2m/sに上がると、波よりも航走それ自体の影響が支配的になっている。周期1.4secで波高が32.6mmの時と周期1.02secで波高が1.63mmの時の両者の波高 H /波長 λ を計算するとほぼ一致するが、図11、12から撓み角もこの時ほぼ一致しているのが見られ、撓みが波の陰しさに比例していることがわかる。また、周期1.02secで、速度0.6m/sと1.2m/sの時の波高による撓み角の違いを見ると、速度が速いほど波高の影響が小さくなることがわかる。

汐路丸の剛性分布下において、船首尾部といった端部と中央部を比較すると、中央部の方が撓みにくく、また船尾部が特に撓みやすいということが分かる。

3. 実船実験

3.1 実験条件

模型実験で得られた結果をもとに、実船でどの程度の撓みがあるのか実験を行った。測定にはレーザ測位計を用い、図13のような装置を作成し、汐時丸に搭載した。すなわち、両端をフリーにした支点間5mの角材(アルミ製)の中央にレーザ測位計を設置し床までの距離を測定する。このとき、船体が撓めば測定距離が変化する。これが測位計の位置における船体撓みとなる。実船実験の場合、実験条件を模型実験のそれと必ずしも一致させることが困難なため、条件の比較的似ているものについて比較検討を行った。

3.2 実験結果

表3は、向かい波で計測したときの実験結果をまとめたものである。同じ9ノットで航走しても、波長が船の長さに近い時の方が、また波高が大きい方が、撓み角も大きいという模型実験と一致した結果が得られている。また、14ノットという高速で航走しても、周期が約15秒と長いと、さほど大きな撓み角が生じないことも模型実験結果と一致している。

表4は、表3における、aとbの条件と比較的似ている模型実験の条件及び撓み角を示したものであるが、a、bとも弾性体モデルの細いタイプの時の撓み角の方が太いタイプの時よりはるかに近い値が得られている。もともと弾性体モデルの細いタイプは、単純に剛性を弱くした場合どのような結果となるかという、比較検討の為に製作したものであったが、実船実験結果は、細いタイプの模型実験結果に値が一致した。(2)式より、モデルの厚さを決定する断面二次モーメント I_M は、実船の断面二次モーメント I_S により決定されるが、実験結果は、この I_S の大幅な減少を意味する。一般に撓みに対する断面二次モーメントの減少については、有効幅なる考え方が導入されているが、これにより断面二次モーメントの減少を試みても、せいぜい太いタイプの場合の三分の一であり、説明がつかない。ここで、実船実験でレーザ測位計の設置した上甲板の縦通材と縦けたのみの断面二次モーメントを取り出したとすると、細いタイプの弾性体モデルの断面二次モーメントにほぼ一致する。これは推論であるが、実船実験で得られた値は、上甲板の局所的な撓みを捉えた可能性が高く、スパンをもっと長くして計測した場合、値は太いタイプに近くなるのではないかと考えられる。ただし、局部的にせよ、少なくとも一部にそれだけの撓みが発生している訳であり、艤装設計上看過できないことではある。いずれにせよ、実船実験についてはさらに検討が必要である。

図13 レーザ測位計による実船実験概要

表3 実船実験結果

	対地速度 (ノット)	絶対波高 (m)	周期 (秒)	撓み角 γ (度)
a	5.0	0.8	4.7	0.0216
b	9.0	0.9	5.2	0.0224
c	9.0	0.9	9.4	0.0174
d	9.0	1.4	9.8	0.0196
e	14.0	1.1	14.7	0.0142

表4 模型と実船の撓み角の比較

	模型実験条件	撓み角 γ (度)
実船実験結果 a	速度 0.6 m/s (実船 6.46 ノット)	弾性体モデル細
	波高 32.6 mm (実船 1.0 m)	0.0182
	周期 1.02 秒 (実船 5.66 秒)	弾性体モデル太
		0.0023
実船実験結果 b	速度 0.9 m/s (実船 9.69 ノット)	弾性体モデル細
	波高 32.6 mm (実船 1.0 m)	0.0214
	周期 1.02 秒 (実船 5.66 秒)	弾性体モデル太
		0.0028

4. まとめ

- (1) 汐路丸における船体の撓みの分布をつかむ事ができた。
- (2) 撓みに関する艤装設計上のデータを得ることができた。
- (3) 実船における撓みは、模型船による予測値（弾性体モデルの太で得られた撓み角）よりはるかに大きいことが分かった。

今後、機会があれば、さらに大型の船舶について撓みに関する実船実験を実施してみたい。

最後に実船実験に際し、練習船汐路丸III世の磯崎道利、芋生秀作両船長をはじめ、乗員の方々にご協力をいただいた。ここに謝意を表す次第である。

また模型実験に際し、船舶運航性能実験水槽の武井幸雄講師、三田重雄助手さらに深田みちる学部学生の協力を得たことに対し謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 真能 創：船体中央の撓み計算法、関西造船協会誌第121号（昭和41年6月）
- (2) 真能 創、他：波浪中の船体曲げ撓みについて、日本造船学会誌（昭和56年11月）

質 疑 応 答

久保雅義（神戸商船大学）：船の切断面には、水は入るのでしょうか。もし、ゴムで防水されているのであれば、撓みへのその影響はどのように考慮されたのでしょうか。

庄司邦昭：ご質問いただき有り難うございます。船の切断面では、外板に沿って薄いゴム膜を張り防水しております。断面における撓みはわずかなので、ゴムの張力が作用することはないと考えています。今回の実験では、ゴム膜の影響を無視して解析しておりますが、今後実験を行う際には、その影響を調べておきたいと考えています。

鳥野慶一（北海道大学水産学部）：綿密な実験に対して敬服いたします。本研究の成果を適用又は応用する対象目的と、計算でなく模型実験を本文中の弾性体モデルを使って行うことの意味について御教示ください。

庄司邦昭：御質問いただき有り難うございます。模型実験を行う目的は、通常の船舶工学に関する実験と同様に計算値との整合性を系統的な外力条件の中でみることがその一つと考えております。弾性応答を調べる場合には、実船の断面二次モーメントと模型船の二次モーメントの対応や、縦通部材の寄与率に関する事項など、もう少し実験による検証が必要だと考えています。また今回のような、部分的弾性模型船の有効性についても検証しておく必要があると思います。