



Title	帆角度制御による横揺れ減揺の研究
Author(s)	芳村, 康男; Yoshimura, Yasuo; 五十嵐, 佳子 他
Citation	日本船舶海洋工学会論文集, 2, 237-242
Issue Date	2005-12
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/8454">https://hdl.handle.net/2115/8454</a>
Rights	Copyright 2005 日本船舶海洋工学会
Type	journal article
File Information	Roll Damping by Sail.pdf



# 帆角度制御による横揺れ減揺の研究

正員 芳村 康男\*  
正員 黒田 貴子\*\*\*

五十嵐 佳子\*\*  
菊本 充弘\*\*\*\*

Roll-damping Control by Sail-angle

by Yasuo Yoshimura, *Member* Yoshiko Igarashi  
Takako Kuroda, *Member* Mitsuhiro Kikumoto,

## Summary

Recent huge amount of CO<sub>2</sub> discharge and the diffusion of detrimental substances by the excessive use of petroleum resources have brought the serious problem of an earth scale such as the global warming. It has been the world common subject for every work of the future to take account of the preserving natural environments. There are several solutions for taking place the petroleum energy. One of them is the wind energy. In 1980's when the petroleum price jumped up with the twice oil crises, the use of wind power was re-examined. Many kind of modern sailing rigs and new concepts of sail-equipped ships were proposed. These researches are summarized in the international symposiums by RINA<sup>1),2)</sup>, and some of them were successful projects among them.

Although the purpose of such sail-equipped ship is obviously the use of the above-mentioned wind energy, it is also empirically known as a secondary effect that the rolling of ship can be reduced by the sail. This comes from the air damping force of sail since the inflow angle of the sail changes with the rolling and this change acts on the direction which decreases the rolling. From this fact, the rolling can be more reduced if the angle of a sail is well controlled against the rolling.

In this paper, the roll-damping mechanism is solved based upon the aero and hydrodynamics, and then the control technique of sail angle for decreasing the rolling for various wind directions is proposed, where the sail angle:  $\Delta\delta_s$  is simply controlled as  $\Delta\delta_s = k\dot{\phi}$ , but the polarity of control gain:  $k$  must be changed with the wind direction and average sail angle. According to this method, the validity and use of this control have been checked by the model experiments. As the results, it is found that the rolling angle can be remarkably decreased when the ship is sailing against the oblique wind and wave.

## 1. 緒言

動力船舶に帆を装備する試みは、1980 代のオイルショックの石油高騰によって、風力エネルギーの利用が見直され、種々の新しい推進装置が開発された。これらの成果は RINA のシンポジウム<sup>1),2)</sup>に要約されている。わが国でも日本船用機器開発協会(当時)が中心になって、機主帆従方式(帆船ではなく帆を補助的に使用)の開発が数多く進められた<sup>3)</sup>。ところが、これら帆装船の初期投資が少なくないこと、また、メンテナンスコストの増大も大きな負担となり、その後、帆装を撤去した船も多い。しかし、近年の化石燃料の大量使用による地球温暖化や有害物質の大気放出拡散が地球規模の問題となるに至り、自然環境を保全しつつ調和のとれた経済社会の持続的発展が世界的な課題となるにつれ、風力エネルギーの利用が再度見直される環境が揃ってきたとも言える。

帆装船の目的は第一に、上記の風力エネルギーの利用にあるが、二次的な効果として、船の横揺れを低減できることが経験的に知られている。これは、帆の角度が一定に固定されていても、横揺れに伴って帆の相対流入速度や流入角が変化し、この変化が横揺れを減少させる向きに作用するため、減揺効果が発生することによる。更にまた、帆の角度を横揺れに応じて上手く制御すると、横揺れを著しく減少できる可能性がある。平山ら<sup>4)</sup>は、無風状態の中を高速船が航走して正面から相対風を受ける場合について数値計算を行い、横揺れ角や角速度に比例した帆角の制御で旋回中の横傾斜を低減できることを示した。しかし、帆装の目的は風力エネルギーの利用にあり、正面からの風では風力エネルギーが活用できないので通常は縮帆され、こうした局面は現実の帆装船では生じず、帆装船では種々の風向を想定する必要がある。

本報では、Fig.1 に示すような簡単なキャンパス帆で、帆の角度を自由に駆動できる三角帆を船尾に装備した状態を供試船として想定し、種々の風向に対して横揺れを低減させる場合の力学的メカニズムを解明し、その制御手法を検討して、その有効性を模型実験で確認することとした。

\* 北海道大学水産科学研究院

\*\* (株)菱友システムズ

\*\*\* (独)海上技術安全研究所 環境・エネルギー研究領域

\*\*\*\* アイシン精機(株)生産技術部

原稿受理 平成 17 年 10 月 14 日

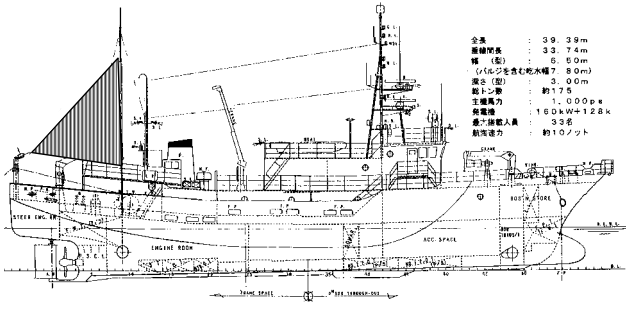


Fig.1 General arrangement of the sail equipped ship.

## 2. 帆による横揺れ減衰のメカニズム

帆は船の推進力だけでなく横方向にも大きな力を発生させ、この横力が船を傾斜させるモーメントになる。帆の力は風向によって、揚力が主体の局面と、抗力が主体となる双方があり、あらゆる風向に対して帆の力の横揺れに及ぼす影響を明確にしておく必要がある。

帆による横傾斜モーメントを  $K_{AS}$  とすると、船が直進中で波浪外力が無い場合の横揺れ  $\phi$  の運動方程式は次式で表される。

$$(I_{xx} + J_{xx})\ddot{\phi} - K_{\phi}\dot{\phi} + \overline{GM}mg\phi = K_{AS} \quad (1)$$

ただし、 $I_{xx} + J_{xx}$ : 横揺れの見かけの慣性二次モーメント

$m$  : 船体質量

$\overline{GM}$  : 船体重心から横メタセンターまでの距離

$g$  : 重力加速度

また、 $K_{\phi}$  は横揺れ減衰係数に相当し、これを減減曲線の線形項  $a_0$  を用いると次式で表される。

$$K_{\phi} = -\frac{2a_0}{\pi} \sqrt{gm\overline{GM}(I_{xx} + J_{xx})} \quad (2)$$

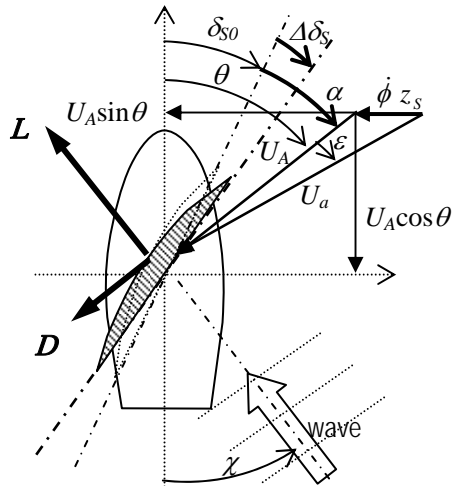


Fig.2 Co-ordinate system for sail on board

相対風速と風向がそれぞれ  $U_a$ 、 $\theta$  で、船の横揺れ角速度が  $\dot{\phi}$  の時、帆に作用する相対風速  $U_a$  と帆の相対迎角の変化  $\varepsilon$  は Fig.2 に示す座標系を用いて、近似的に次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} U_a &= \sqrt{U_A^2 + 2U_A\dot{\phi}z_S \sin\theta} \\ \varepsilon &= \sin^{-1}\left(\dot{\phi}z_S \cos\theta / U_A\right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

したがって、帆による傾斜モーメント  $K_{AS}$  は次式で表される。

$$\begin{aligned} K_{AS} &= -\{L \cos(\theta + \varepsilon) + D \sin(\theta + \varepsilon)\} \cdot z_S = -\frac{\rho_a}{2} A_S U_a^2 z_S \\ &\times \left\{ C_L \left( \cos\theta - \frac{\dot{\phi}z_S}{U_A} \cos\theta \sin\theta \right) + C_D \left( \sin\theta + \frac{\dot{\phi}z_S}{U_A} \cos^2\theta \right) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

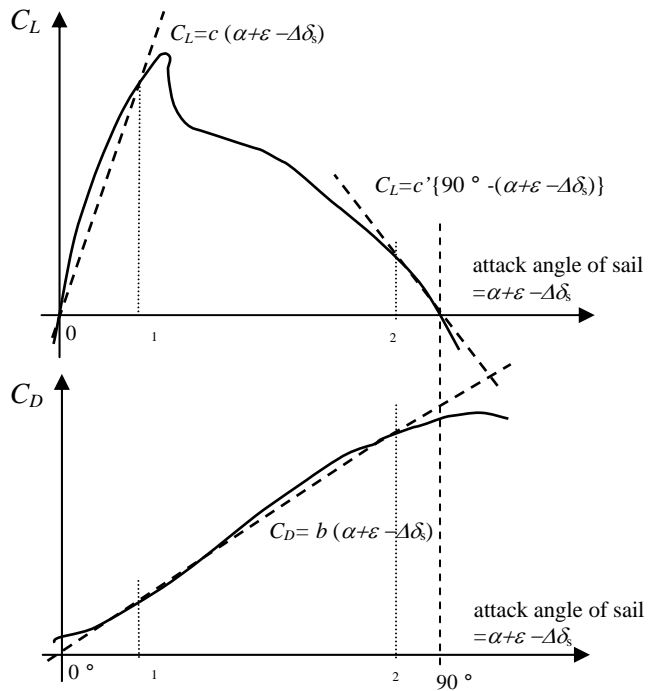


Fig.3  $C_L$  and  $C_D$  of sail

### 2.1 帆の揚力が主体で迎角が小さい場合

Fig.2 の座標系に示すように、帆の角度を  $\delta_{S0}$  として帆の迎角が  $\alpha$  で航走している場合、横揺れ角速度が  $\dot{\phi}$  で、かつ帆の角度を  $\Delta\delta_S$  回転させると、帆の相対迎角は  $(\alpha - \Delta\delta_S + \varepsilon)$  となる。ここで帆の迎角が Fig.3 の  $\alpha_1$  付近のように、主に帆の揚力  $L$  を主体とする向かい風から横風の局面を想定する。この場合 Fig.3 のように、揚力係数  $C_L$  と抗力係数  $C_D$  が迎角に比例すると仮定すると、 $C_L = c(\alpha - \Delta\delta_S + \varepsilon)$   $C_D = b(\alpha - \Delta\delta_S + \varepsilon)$  となり、帆の角度を横揺れ角速度に比例して  $\Delta\delta_S = k\dot{\phi}$  と制御した場合、線形の減減係数は次式となる。

$$\begin{aligned}
a = & a_0 + \frac{\pi}{2\sqrt{gmGM(I_{xx} + J_{xx})}} \cdot \frac{\rho_a}{2} z_s^2 A_S U_A \\
& \times \{ (c+b\alpha) \cos^2 \theta + (c\alpha + b) \cos \theta \sin \theta + 2b\alpha \sin^2 \theta \} \\
& - \frac{\pi}{2\sqrt{gmGM(I_{xx} + J_{xx})}} \cdot \frac{\rho_a}{2} z_s A_S U_A^2 (c \cos \theta + b \sin \theta) k
\end{aligned}
\tag{5}$$

上式中  $a_0$  は帆が無い場合の減減係数である。第2項が、帆角が一定で制御しなくてもパッシブに減揺する部分であり、これは帆面積  $A_S$ 、帆の相対風速  $U_A$ 、船の重心と帆の中心までの距離  $z_s$  の自乗に比例する。第3項が帆の制御によりアクティブに変化する部分であり、その大きさは帆面積  $A_S$  の他、帆の揚力係数勾配  $c$ 、帆の相対風速  $U_A$  の自乗、船の重心と帆の中心までの距離  $z_s$ 、および帆の角度の制御定数  $k$  に比例して大きくなって、前者のパッシブな減揺と構造がやや異なることが理論的に示される。

### 2.2 帆の抗力が主体で迎角が大きい場合

他方, Fig.3 の  $\alpha_2$  付近のように、帆の迎角が  $90^\circ$  に近く、抗力  $D$  が主体となる追い風の局面では、揚力傾斜が迎角に対して逆の特性になるので、 $C_L = c' \{ 90^\circ - (\alpha - \Delta\delta + \varepsilon) \}$  となる。また、抗力係数は前述と同様、 $C_D = b(\alpha - \Delta\delta + \varepsilon)$  となり、帆の角度を横揺れ角速度に比例して  $\Delta\delta = k\dot{\phi}$  と制御すると、減減曲線の線形項減減係数は次式となって、アクティブに減揺する第3項の極性は(5)式と逆になり、この場合の減揺に必要な帆の角度は、揚力が主体の(5)式の場合と逆方向となる。

$$\begin{aligned}
a = & a_0 + \frac{\pi}{2\sqrt{gmGM(I_{xx} + J_{xx})}} \cdot \frac{\rho_a}{2} z_s^2 A_S U_A \\
& \{ (b\alpha_2 - c') \cos^2 \theta + c' (90^\circ - \alpha_2) \cos \theta \sin \theta + b \sin \theta + 2b\alpha_2 \sin^2 \theta \} \\
& + \frac{\pi}{2\sqrt{gmGM(I_{xx} + J_{xx})}} \cdot \frac{\rho_a}{2} z_s A_S U_A^2 (c' \cos \theta - b \sin \theta) k
\end{aligned}
\tag{6}$$

### 3. 自由横揺れ試験による減衰の計測

Fig.1 に示した供試模型船について、停止状態の自由横揺れ模型試験を行った結果を以下に示す。供試模型船および帆の主要目を Table.1 に示す。

Table.1 Principal dimensions of ship model.

$L_{pp}$ (m)	1.9062	$\overline{GM}$ (m)	0.0485
$B$ (m)	0.3672	$T_\phi$ (sec)	1.29
$d_m$ (m)	0.1469	( $m^3$ )	0.0756
$A_S$ ( $m^2$ )	0.07(=0.4 × 0.35)	$z_s/d_m$	2.38
aspect r.	2.29	$A_S/Ld$	0.250

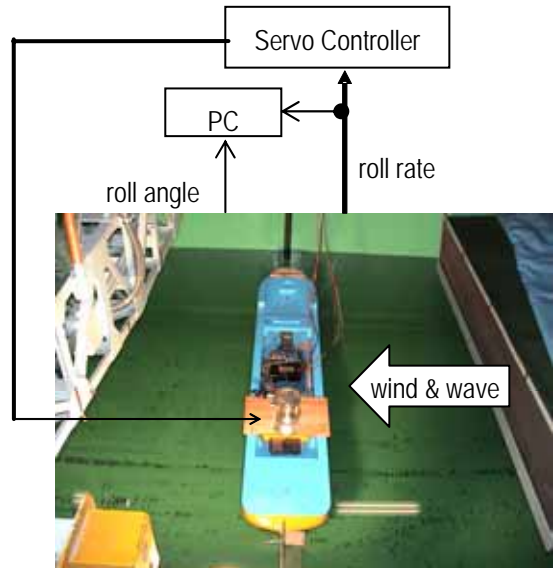


Fig.4 Arrangement for experiment.

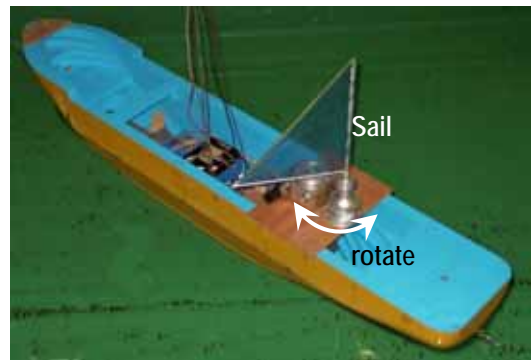


Fig.5 Ship and sail model.

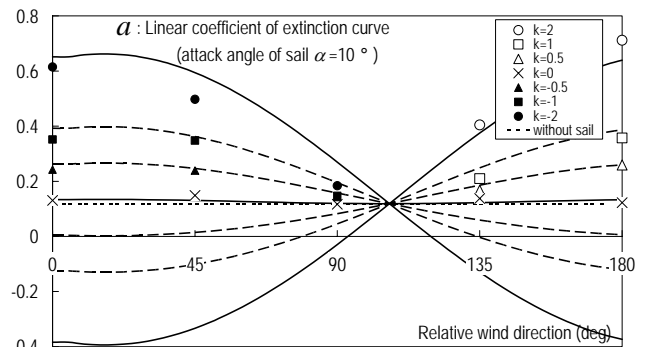


Fig.6 Comparison of extinction coefficient for various roll-rate feedback gain  $k$ , between measured and calculated ( $\alpha=10^\circ$ ).

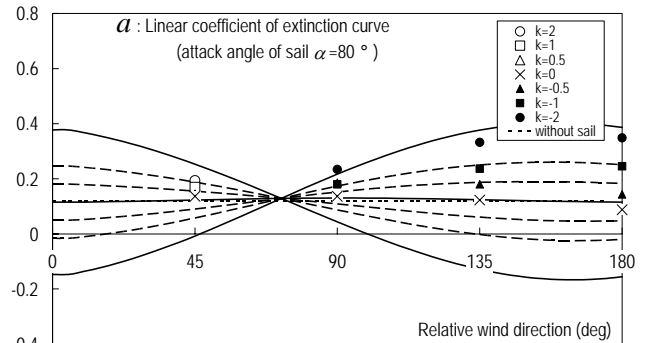


Fig.7 Comparison of extinction coefficient for various roll-rate feedback gain  $k$ , between measured and calculated ( $\alpha=80^\circ$ ).

試験は Fig.4 に示すように、造波と送風が可能な北海道大学水産学部の長水槽において実施した。模型船は、roll をできる限り拘束しないよう船首と船尾を 2 本のワイヤーで yaw と sway をヒンジ拘束し、制御定数:  $k$  を種々に変えて実験を行った。なお、横揺れの回転軸は重心高さとした。模型帆は Fig.5 に示すように、高さ 400mm × 底辺 350mm のビニルシートで製作した。マスト・ブームはアルミパイプを使用し、帆の旋回による重心の横方向変化による横揺れへの影響を極力小さくした。帆の角度はサーボモータにプーリー及びワイヤーを介してマスト全体を回転させる機構とした。また風速は 6m/s (一定) とした。解析した減減曲線の線形係数  $a$  を (5) 式あるいは (6) 式による理論式と比較してそれぞれ Fig.6、Fig.7 に示す。図中の  $\times$  の各印は  $k=2, 1, 0.5, 0$  (固定),  $-0.5, -1, -2$  における線形の減減係数であり、各曲線が上記と同じ  $k$  に対応する理論推定結果である。

### 3.1 帆の揚力が主体で迎角が小さい場合

揚力が主体の場合、減減曲線の線形係数  $a$  を Fig.6 に示す。相対風向が正面から約  $115^\circ$  までは  $k$  の極性が負、 $115^\circ$  から後方の風では正の場合に帆によるアクティブな減減係数が増加し、横揺れを減揺することができる。また、それぞれ  $k$  の絶対値を大きくすると、その大きさにほぼ比例して横揺れの減減係数が増加することが実験でも確認できる。ここで  $k$  の極性を逆にすると、減衰が悪くなるばかりか、帆が無い場合の減減係数より低下し、自由横揺れ試験でも横揺れが時間と共に増加する自励振動状態が観測された。また、相対風向が真横付近では、帆の揚力の大半が船の前後方向の推進力となり、横方向の力は帆の抗力だけになるから、制御定数を大きくしても帆による減揺効果は小さい。

### 3.2 帆の抗力が主体で迎角が大きい場合

抗力が主体の場合の減減曲線の線形係数  $a$  を Fig.7 に示す。前述とは逆に、相対風向が正面から  $75^\circ$  までは  $k$  の極性が正、 $75^\circ$  から後方の風では負の場合にアクティブな減減係数が増加し、横揺れを減揺することができる。また、それぞれ  $k$  の絶対値を大きくすると、その大きさに比例して横揺れの減減係数が増加するが、前述の 3.1 より増加は少ない。これは主に、抗力が主体の場合の揚力係数勾配の絶対値が小さいことによっている。

## 4. 波浪中の横揺れ応答試験結果

前述の自由横揺れ試験の状態に加えて規則波を発生し、波浪中の動揺試験を実施した。風向と風速は同一方向で、風速は 6m/s、波高は 4~6cm ( $H_w/dm=0.24\sim 0.35$ ) とした。実験結果の一例として、風向が  $45^\circ$ 、波向が  $135^\circ$  の状態(風・波とも斜め向かい)で横揺れの同調点付近の波長において、帆を固定した  $k=0$  の状態から帆の角度を制御する  $k=-1.0$  に変

えた場合の横揺れのタイムヒストリを Fig.8 に示す。帆の角度を制御することによって、横揺れ角が直ちに半分以下に減少する様子がわかる。

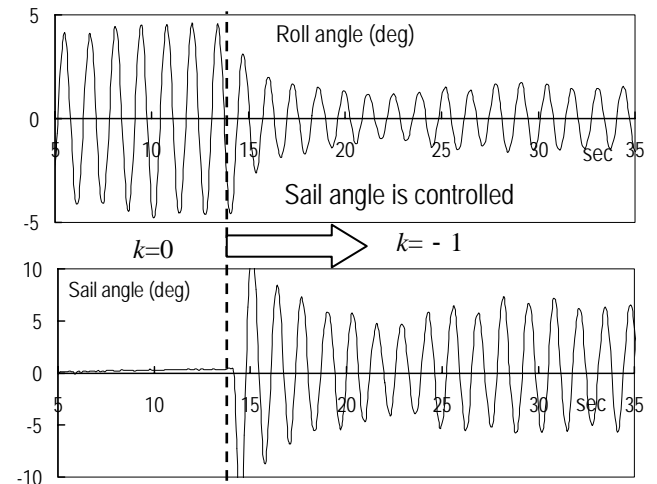


Fig.8 Time histories of roll and sail angle where  $k$  is changed from 0 to  $-1$ . ( $\theta=45^\circ, \chi=135^\circ$ ).

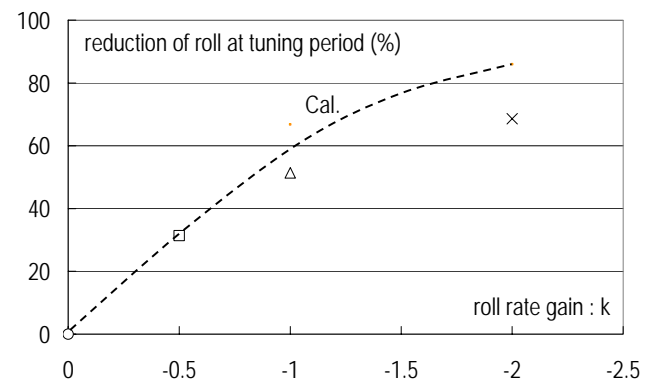
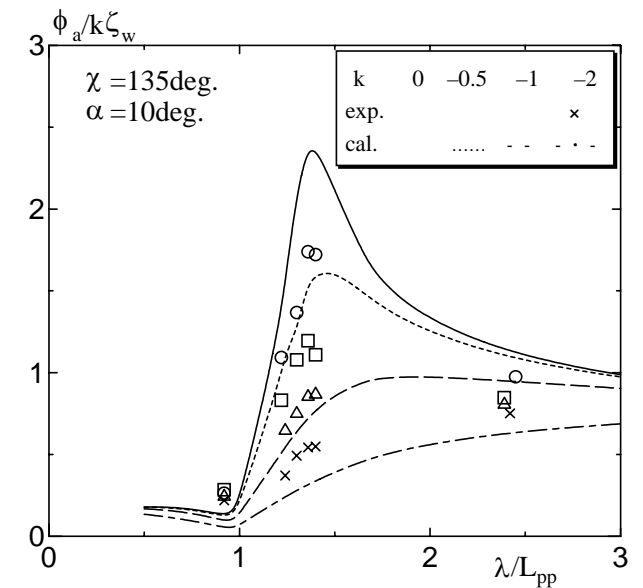


Fig.9 Frequency response of roll angle and roll reduction at tuning period. ( $\alpha=10^\circ, \theta=45^\circ, \chi=135^\circ$ )

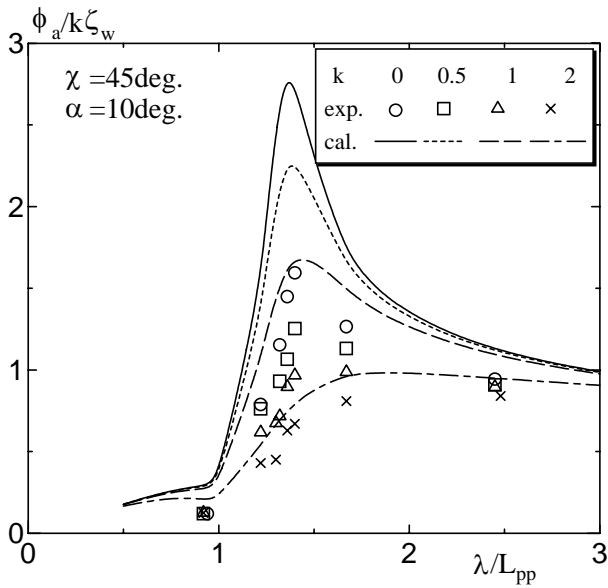


Fig.10 Frequency response of roll angle and roll reduction at tuning period. ( $\alpha=10^\circ, \theta=135^\circ, \chi=45^\circ$ )

Fig.9 の上図には上記の風・波の方向で、種々の波長に対する横揺れ応答関数を示す。計測された横揺れ振幅 $\phi_a$ は波の最大傾斜角で無次元化して表す。横軸は波長船長比 ( $\lambda/L_{pp}$ ) である。ただし、波長 $\lambda$ は波周期から推算した。同図にはストリップ法により求めた理論値も示す。ただし、この理論的推定では、前述の自由横揺れ試験より求めた減減曲線を N 係数(2 次式)の形で与えた。また、実験では sway が拘束されているのに対し、計算では自由としていることから両者の応答に違いが現れている。実験と理論計算結果から、この状態においては、帆の角度の制御定数  $k$  をマイナス側に増加することにより、特に同調付近の横揺れを大幅に低減できることが確認できる。

Fig.9 の下図には、帆の角度の制御定数  $k$  の値に対する同調点の横揺れ振幅の減少量を示す。縦軸は帆の角度を制御しない場合の振幅を 100%として表示する。実験結果と理論計算では多少の違いがあるが、 $k=-2$  においては横揺れ振幅の減少量は著しく、70%にも達している。

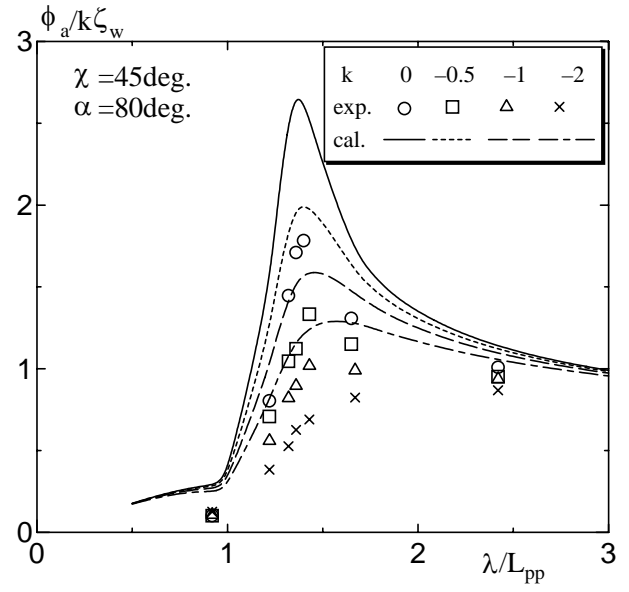


Fig.11 Frequency response of roll angle and roll reduction at tuning period. ( $\alpha=80^\circ, \theta=135^\circ, \chi=45^\circ$ )

一方、斜め後方からの相対風速に対しては、帆の推力に揚力を使う場合と抗力を使う双方が存在する。Fig.10 にはまず、揚力が主体となる局面で風向が  $135^\circ$ 、波向が  $45^\circ$  の状態の種々の波長に対する横揺れ応答関数と同調点の横揺れ振幅の減少量を示す。この場合、帆の角度を制御しない場合の横揺れ振幅は前述の斜め向かい波よりやや小さいが、制御定数  $k$  をプラスに増加させることによって横揺れを大きく減少させることができ、 $k=2$  における減少は 60%に達する。

この風・波の向きで抗力が主体となる場合の結果を Fig.11 に示す。この場合は制御定数  $k$  をマイナスに増加させることによって横揺れを減少させることができ、 $k=-2$  においては上記とほぼ同程度の減少量が得られる。

以上のように、補助推力を与える帆の角度を効果的に制御することによって、風・波が存在する実海域で横揺れを大きく減少できることが明らかとなった。ただし、本模型実験の風速をフルード則で実船に換算すると 24m/s の強風に相当し、やや非現実的である。これに対しては既に 2.1 に示したように、帆角制御による減揺効果は帆面積、相対風速の自乗、

帆の高さや揚力係数に比例していることから、例えば 12m/s 程度といった風速で本実験と同等な減揺効果を得るには 4 倍程度の面積が必要で、アスペクト比の大きい帆を装備すれば更に効果的に減揺できることになる。

## 5. 結言

帆の角度を制御して横揺れを減少させる時の力学的メカニズムとその制御方法について検討した。主な結論を以下に要約する。

- 1) 帆装船において帆の角度を横揺れ角速度に比例して制御すると、船の横揺れを容易に低減させることができる。ただし、制御定数  $k$  の極性は風向や帆の迎角の状態を変える必要がある。揚力が主体の場合は、相対風向が正面から約  $115^\circ$  までは  $k$  の極性が負、 $115^\circ$  から後方の風では正。逆に抗力が主体の場合は、相対風向が正面から  $75^\circ$  までは極性が正、 $75^\circ$  から後方の風では負の場合にアクティブな減減係数が増加し、横揺れを減揺することができる。
- 2) このような制御を行った場合、帆面積、帆の揚力係数勾配、帆の相対風速の自乗、船の重心と帆の中心までの距離  $z_S$ 、および帆の角度の制御定数  $k$  に比例して横揺れ減衰が増加することが理論と実験で確認できた。
- 3) この減揺効果を規則波中の模型実験で確認した結果、各風向で減揺効果が現れ、特に風向  $45^\circ$ 、波向  $135^\circ$  で揚力が主体の局面（帆の迎角が  $10^\circ$ ）においては減揺が著しく、風速 6m/s で制御定数  $k = -2$  で、同調付近の横揺れを 70% 程度減少させることができる。
- 4) 本模型実験の風速をフルード則で実船に換算すると 24m/s の強風に相当するので、例えば 12m/s 程度の風速で上記 3) と同等な減揺効果を得るには 2) の結論から、4 倍の面積を持つ帆が必要になる。

なお、本報における横揺れ実験は、船の停止状態を基本にしており、横揺れ減衰が小さく揺れやすい状態がベースになっている。航行中は一般に船体自体の横揺れ減衰が増加するから、帆による減衰効果はこの分、相対的に減少する傾向となることに注意を要する。また、帆の角度を横揺れに応じて変えることは、推進性能面で最適な帆装状態を外すこととなり、補助的ではあるが帆の推進性能を損なうことは免れない。しかし、帆の平均角度は依然最適角であるので、大幅な推進性能の減少にはつながらないと考えられる。

今後の課題として、帆の角度を連続的に駆動可能な実システムの開発の他、実船に対応した制御も必要になる。今回の理論検討や実験では、帆の角度が roll rate に対し遅れがなく

追従するとして取り扱ったが、実際の帆の駆動装置を想定すると、遅れや追従速度の制限等が発生する。今後こうした場合の制御方法についても検討が必要と考えられる。

## 謝 辞

本研究の模型実験の実施に際しては、北海道大学水産科学研究科生産工学講座（現 水産科学院海洋産業科学講座）の多くの学生諸氏のご協力を頂いた。ここに感謝申し上げる次第である。

## 参考文献

- 1) Symposium on Wind Propulsion of Commercial Ships. RINA Symposium Proceedings, 1980
- 2) International symposium on wind ship technology (Windtech'85). RINA Symposium Proceedings, 1985
- 3) 日本舶用機器開発協会：帆装タンカー新愛徳丸について、1985
- 4) 平山次清，斎藤靖浩，宮川清，高山武彦：新形式アンチローリングシステムの開発，関西造船協会誌，第 230 号，1998，pp.205-211