フィンスタビライザの船体減揺性能に及ぼす フィン面積および制御方式の影響*

川 添 強** 錦 戸 真 吾***
和 田 洋 二 郎****

Effect of Fin Area and Control Methods on Reduction of Roll Motion with Fin Stabilizers

By Tsuyoshi Kawazoe, Shingo Nishikido, Yojiro Wada

In recent year, a fin stabilizer has been widely used as a hull stability instrument for a patrol boat, defence ship, car ferry and passenger ship.

This paper presents some investigations on the influence of the fin area and the control method on the reduction of roll with the fin stabilizer in view of full scale test results. In order to select the optimum fin area, it is important to use not only empirical wave slope capacity, but simulation including rolling probability based on hull motion theory as design criteria. The rolling reduction performance by PID control method is decreased under the condition of long periodic wave. This problem however can be solved by newly developed fuzzy control method.

1. ま え が き

フィンスタビライザは、船体から両舷に張り出したフィンの発生揚力を利用し、船の横揺れ（ローリング）を軽減する船体動揺安定装置である。この技術は、1922年に元良信太郎博士によって発明され、その後、英国において技術継承され実用化された。^{1)・2)} 我が国においては、当初、艦船や巡視船のヘリコプタの安全離着船を目的として、固定式フィンスタビライザ（フィンが両舷に張り出したままのタイプ）が装備されてきた。最近では、居住性の改善および荷崩れ防止の観点から、フェリーや客船用に引込み式のものが多く採用されるようになってきている。（図1）

しかしながら、実船におけるフィンスタビライザ

の減揺性能は、外的な海象条件、船体要目を含む船体パラメータおよびフィンスタビライザ自体の電氣的機械的パラメータが複雑に影響するため、明確に把握しがたい問題点を有する。これはそのまま、フィンスタビライザの計画段階において、いかに最適なフィン面積を選定するかにつながってくる。

ここでは、実船試験による横揺れデータをもとに、

図1 引込み式フィンスタビライザ

*原稿受付 平成4年8月21日

第49回春季学術講演会

**正会員 長崎大学（長崎市文教町1-14）

***正会員 三菱重工長崎造船所（長崎市飽ノ浦町1-1）

****三菱重工長崎研究所（長崎市文教町3-48）

フィン面積の選定法および最新のフィン制御方式について検討し考察を加えた。

2. 減揺性能の評価基準

フィスタビライザは、図2に示すように船体の中央付近に装備され、船体動揺検出器から制御装置を介した電気信号に基づき、両舷1対のフィンが油圧によって互いに反対方向に傾転させられる。このフィン傾転とフィンに流入する海水速度によって揚力が発生し、これが船体の復元モーメントとして作用し、船体の横揺れが軽減されることになる。

(図3)

一般に、フィスタビライザの減揺性能を評価する基準としては、定傾斜容量 θ_{WSC} が広く用いられている。³⁾これは平水中において、フィンの最大揚

図2 フィスタビライザの作動系統図

図3 フィスタビライザの減揺原理

力 F により生じる船体の横傾斜角度で定義され、次式により算出される。

$$\text{定傾斜容量 } \theta_{WSC} = \sin^{-1} \left(\frac{F \cdot L}{\Delta \cdot GM} \right) \quad (1)$$

但し、 Δ : 船の排水量、 GM : メタセンタ高さ

L : 復元モーメントのアーム長さ

この定傾斜容量は海上運転等で確認され、フィンの静的復元力の大きさを評価することができる。

この他、減揺性能の評価基準として横揺れ減衰率 R なるものがある。これは、制御系、油圧系および駆動系の動特性を含めて減揺性能を総合的に評価するものである。この方法は穏海中でフィンを作動させ、予め船体に強制的に動揺を与える。その後、フィンを止めて船自体の復元力にまかせて自然減衰させた場合と、フィンの作動により強制的に減衰させた場合に分けて試験を行なう。図4には、実船試験における自然減衰と強制減衰の横揺れ角度の計測例を示す。これらの計測結果をもとに、(2)および(3)式より自然減衰係数 C_n と強制減衰係数 C_s が求められる、(4)式よりフィン作動時と非作動時の横揺れ倍率 M_{fs} と M_{fu} が計算される。横揺れ倍率により、図5に示すように異なる出会い波周期(または波周期)をベースとした船体の横揺れ特性が把握される。横揺れ減衰率 R は(5)式に示すように、 M_{fs} と M_{fu} の関数として推算され、フィスタビライザのシステム全体の応答性を含む減揺性能の評価基準となる。

$$\text{自然減衰係数 } C_n = \frac{1}{2\pi} \ell_n \frac{\phi_n + \phi_{n+1}}{\phi_{n+2} + \phi_{n+3}} \quad (2)$$

$$\text{強制減衰係数 } C_s = \frac{1}{\pi} \ell_n \frac{\phi'_n}{\phi'_{n+1}} \quad (3)$$

但し、 $\phi_n \sim \phi_{n+3}$ および $\phi'_n \sim \phi'_{n+1}$ は図4参照横揺れ倍率

$$M_{fs, u} = \frac{1}{\sqrt{(1 + (\frac{\omega}{\omega_n})^2)^2 + (2C_{s, u} \frac{\omega}{\omega_n})^2}} \quad (4)$$

但し、 M_{fs} : フィン作動時の横揺れ倍率

M_{fu} : フィン非作動時の横揺れ倍率

ω : 波の角周波数、 T : 波の周期

ω_n : 船体の固有角周波数、 T_n : 船体横揺れ固有周期

$$\text{横揺れ減衰率 } R_r = \frac{M_{fu} - M_{fs}}{M_{fu}} \quad (5)$$

図4 自然減衰と強制減衰の実船試験結果

3. フィン面積の最適化

フィスタビライザを用いて船の横揺れを軽減する場合、最適なフィン面積をいかに選定するかが重要なポイントとなる。一般に、フィン面積を大きくすると揚力が増加するが、その分、フィンに発生する抗力も大きくなり船速の低下を招く。また、フィスタビライザの装備スペースや製造コスト等の関係からみても、できる限り小さなフィン面積で大きな減揺性能を有するものを選定する必要がある。

ここでは、従来の方法を含め最適なフィン面積の選定法について、実船試験データを参考にしながら、その検討結果を記述する。

3.1 定傾斜容量に基づく選定法 最も簡単にフィン面積を選定する基準として、図6に示すように個々の船に対し経験上必要とされる定傾斜容量 θ_{WSC} を求め、これを満たすフィン面積を選定する方法があげられる。即ち、(6)式によりフィン面積が計算される。

片舷分のフィン面積

$$A_f = \frac{\Delta \cdot GM \cdot \sin \theta_{WSC}}{\rho \cdot C_L \cdot V^2 \cdot L} \quad (6)$$

但し、 ρ : 海水の密度、 C_L : フィンの揚力係数
 V : 船速

しかしながら、この方法では排水量とメタセンタ高さが大きい元来揺れにくい船に対して、これを揺らすだけの大きなフィン面積が比例計算され、必要以上に大きなフィン面積を選定することがあり得る。そこで、フィン面積選定の最適化の第一歩として、実船試験より得られた定傾斜容量と横揺れ減衰率との関係を調査し、図7に整理してみた。一般的には、定傾斜容量の増加とともに横揺れ減衰率が一様増加すると期待されるが、実船試験の結果では両者の間には必ずしも一定の関係はなく、定傾斜容量にか

図5 フィン作動及び非作動における船体の横揺れ特性

図6 定傾斜容量に基づくフィン面積の選定法

かわらず横揺れ減衰率は約60～80%の範囲に収まっていることが分る。次に、図8は実船試験における定傾斜容量と強制減衰係数の関係を整理したものである。この図においても、強制減衰係数は大きく分散しており、定傾斜容量との関係を明確に見い出せないことが分る。

図7 実船試験における定傾斜容量と横揺れ減衰率の関係

図8 実船試験における定傾斜容量と強制減衰係数の関係

このように実船試験において、横揺れ減衰率および強制減衰係数と定傾斜容量が一定の関係を示さない理由として、波強制力による船体の応答性およびフィスタビライザの応答性⁴⁾(船体動揺を検知してフィンが作動し揚力を発生するまでの応答速度)が、定傾斜容量以上に船体減衰性能に強く影響しているためと考えられる。以上より、最適なフィン面積を選定するためには、従来の定傾斜容量方式だけでは必ずしも十分でないことが理解される。

3.2 船体運動計算に基づく選定法 波浪中におけるフィスタビライザの減揺性能を把握するためには、特に波強制力による船体応答を考慮する必要があることが分った。波浪中の船体運動を計算する手法^{5), 6)}には、ストリップ法を基礎にした理論計算法が実用化されており、この理論計算の妥当性は水槽試験および実船試験で評価される。

フィスタビライザを装備した状態での計算は、船体運動方程式の中に船体に作用する外力として、フィン流体力を加えたものとなり、図9に示すような計算条件が設定される。船体運動計算に基づくフィン面積の選定においては、フィン面積を仮定し図9に示す多様な条件を組合せて、コンピュータによる船体動揺のシミュレーション計算を行なう。

図9の船体要目の中で、特に船体の横揺れ固有周期と自然減衰係数の的確な推定が非常に重要となる。横揺れ固有周期 T_n は、船の環動半径に関する係数 C_x 、船幅 B およびメタセンタ高さ GM の関数として次式で示される。

$$\text{横揺れ固有周期 } T_n = C_x \cdot \frac{B}{\sqrt{GM}} \quad (7)$$

図10は横揺れ固有周期の推定精度を上げるために、実船試験結果をプロットしたものである。この図より、横揺れ固有周期は $C_x=0.9$ を中心に分散していることが理解できる。また、図11には実船試験により得られた自然減衰係数をフルード数の関係で整理

図9 フィスタビライザの計画における船体運動計算の条件

したものである。これより、自然減衰係数は $C_n=0.14$ を中心に分散していることが分る。

次に、図9の計算条件の中でフィンの揚力特性、即ち、揚力係数の把握が重要となるが、フィン角度に対する揚力係数および揚力勾配については、フィンの断面形状との関係から種々のデータが公表されている。⁷⁾ 船体運動計算に基づく選定法では、フィン揚力を求めるためにフィンの機械的な角度と船体運動（特にヒービング）により時々刻々変化する付加迎角を組合せて、流体力学的に有効な実フィン角度を用いシミュレーション計算を行なっている。従って、機械的フィン角度ではキャビテーションが発生しなくても、有効実フィン角度ではキャビテーションが発生し揚力の減少が起こり得る。このため、図12に示すような空洞水槽におけるフィンの揚力特性試験が重要となる。

3.3 フィン面積の選定例 表1に示すような船体要目をもつカーフェリーを対象にフィン面積の選定例を以下に示す。

3.3.1 定傾斜容量に基づく選定例 定傾斜容

図10 実船試験における船体の横揺れ固有周期

図11 実船試験における自然減衰係数

量は船の種類によって経験的に設定され、カーフェリーの場合は約 5° と推定される。これをもとに、(6)式より片舷分のフィン面積を計算すると、 $A_f=7.0\text{m}^2$ となる。

3.3.2 船体運動計算に基づく選定例 本船の運航ルート（関東～九州）の太平洋沿岸の海区は、図13に示す日本沿岸海区によるとE08およびE09Nに相当する。この海区では、波高 2.75m （波周期 $6\sim 7\text{sec}$ ）以下の海象条件が年間の80%以上となることが報告されている。⁸⁾ 従って、本船用のフィスタビライザは、波高 3m 、波周期 6.7sec 条件で検討することとした。

既述のように、船体運動計算に基づく選定法では予めフィン面積を仮定し、種々の計算条件を組合せてコンピュータによるシミュレーション計算を行なう。ここでは、フィン面積 5.0m^2 と 7.0m^2 を仮定し、全方向波における横揺れシミュレーション結果について述べる。図14には、波方向を船首方向から向波、横波および追波と変化させ、フィスタビライザの非作動時と 5.0m^2 および 7.0m^2 のフィン作動時における横揺れ有義値を示す。この図より、出会い波周期が船体固有周期に最も近似する追波 50° 付近で船の横揺れが最大となる。追波 50° 近傍での横揺れ有義

表1 フィン面積選定の対象船要目

船 長	146.0 m
船 幅	26.1 m
喫 水	6.5 m
排 水 量	11,400 ton
GM	1.5 m
船 速	20.0 knts
横揺れ固有周期	17.0 sec
航 路	関東～九州

図12 空洞水槽におけるフィンの揚力特性試験

図13 日本沿岸海区

図14 全方向波における横揺れ有義値の比較

値は、非作動時で約 5.5° 、 5.0m^2 のフィン作動時で約 2.2° 、 7.0m^2 で約 1.5° を示し、横波 90° では 5.0m^2 と 7.0m^2 ではほとんど差がないことが分る。

図15には、波高 3m 、追波 60° の海面状態において、統計的手法を用いた横揺れ超過確率の計算結果を示す。これより、横揺れ有義値が 3° を越える確率は非作動時で約 60% 、 5.0m^2 のフィン作動時で約 13% 、 7.0m^2 で約 1% であることが分る。通常使用される横揺れ角 5° 以下の要求仕様であれば、定傾斜容量より選定されるフィン面積 7.0m^2 でなく、 5.0m^2 を採用しても十分な減揺性能を有することが理解される。

4. フィスタビライザの減揺性能と制御方式

一般にフィスタビライザではPID制御方式が用いられ、フィン角度 β を横揺れ角 ϕ 、横揺れ角速度 $\dot{\phi}$ および横揺れ角加速度 $\ddot{\phi}$ に比例させてコントロールしている。この時、フィンの発生する揚力 F がフィン角度に比例すると仮定すると、フィスタビライザを装備した船体の運動方程式は次式で表わされる。

$$I \cdot \ddot{\phi} + C \cdot \dot{\phi} + \Delta \cdot g \cdot \overline{\text{GM}} \cdot \phi = \Delta \cdot g \cdot \overline{\text{GM}} \cdot \theta_w + F \cdot \beta \quad (8)$$

$$\beta = K_1 \cdot \phi + K_2 \cdot \dot{\phi} + K_3 \cdot \ddot{\phi} \quad (9)$$

$$F = \rho \cdot A_f \cdot L \cdot V^2 \cdot dC_L/d\beta \quad (10)$$

但し、 I ：船の慣性モーメント、 C ：横揺れ減衰係数、 θ_w ：波傾斜角、 ρ ：海水の密度、 A_f ：フィン面積、 L ：モーメント・アーム長さ、 V ：船速、 $dC_L/d\beta$ ：フィンの揚力勾配、 K_1 、 K_2 、 K_3 ：比例ゲイン

図15 横揺れ超過確率による減揺性能の評価

フィンの横揺れ性能を高めるには、(9)式中の比例ゲイン K_1 、 K_2 、 K_3 の設定が重要となる。PID制御方式では不規則波を考慮して、通常、横揺れ角速度ゲイン K_1 を最大に、次に角加速度ゲイン K_2 および角度 K_3 の順に設定することになる。

しかしながら、図16に示すように波周期 T が船体の横揺れ固有周期 T_n よりも長くなる時、即ち、 T_n/T が 1.0 以下になる時、PID制御方式では減揺性能が低下する。換言すれば、周期の長い波がきた時、または、追波のように出会い波周期が長くなる時、

船体は大きな波の上に乗って大きく傾斜することになる。この対策として、著者等はファジー制御方式^{9), 10)}を開発・実用化した。この方式は、海象条件に応じて自動的に制御ゲインを変化させるもので、長周期の波に対しては角度ゲイン K_3 が高められ、姿勢制御の考え方が導入されて船体の傾斜を低減する。このように、ファジー制御方式はPID制御方式に比べ、長周期の波に対してフィスタビライザの減揺性能を向上させたものである。図17には比較的長い出会い波周期条件において、PIDとファジー制御方式を用いた場合の水槽試験結果を示す。ファジー制御方式は、PIDに比べてフィンが大きな角度で作動し、船体横揺れ角度も減少している様子が認められる。ファジー制御方式は、既に5隻の就航船

に装備され成果を上げている。

5. 結 論

実船試験データをもとに、フィスタビライザの船体減揺性能とフィン面積および制御方式の関係について検討した結果、次のことが把握できた。

- (1) 船体の減揺性能に対しては、波強制力による船体の応答性が強く影響をしている。従って、最適なフィン面積を選定するためには、経験に基づく定傾斜容量だけでなく、船体運動理論に基づくシミュレーション計算が重要となること。
- (2) 船体運動のシミュレーション計算では、波条件やフィン条件等を種々に組合せることが可能となり、全方向波の横揺れ角度および横揺れ超過確率が推定されること。
- (3) 従来のPID制御方式は、長周期の波の上に船体がかかるような場合、十分な減揺性能を発揮できない。これに対し、著者等が開発したファジー制御方式は、波条件に対応して制御ゲインが自動可変となり、全周期の波に対し減揺性能が向上すること。

終りに、フィスタビライザの実船試験に御協力いただいた九州郵船(株)殿に厚く謝意を表します。

文 献

- 1) 船用機関学会編、船用機関計画便覧(昭44)、1446、コロナ社。
- 2) 大串、理論船舶工学、下巻(昭50)、52、海文堂。
- 3) L.W.Nelson and D.Maccallum, Naval Engineers Journal, Oct., (1978)、29。
- 4) 川添ほか3名、船機構49回前刷、(平4-5)、124。
- 5) G.G.Cox and A.R.Lloyd, SNAME Transaction, 85 (1977)、51。
- 6) 高石、日本造船学会第2回耐航性に関するシンポジウム、2章(昭52-12)、109。
- 7) A.R.Lloyd, Royal Institution of Naval Architects, 117, (1974)、233。
- 8) 日本気象協会編、日本沿岸海象調査報告書(平3-4)、15。
- 9) 菅野、ファジー制御、(平2)、128。日刊工業新聞社。
- 10) 大須賀ほか2名、船機誌、25-10(平2-10)、677。

図16 ファジー制御による横揺れ特性の改善

図17 水槽試験におけるPID制御とファジー制御の比較