

高精度パネル法を用いた高性能ステータフィンの開発

Development of High-Performance Stator Fin by Using Advanced Panel Method

星野 徹 二^{*1}
Tetsuji Hoshino

大 島 明^{*2}
Akira Oshima

藤 田 一 誠^{*3}
Kazunobu Fujita

黒 岩 隆 夫^{*4}
Takao Kuroiwa

林 文 夫^{*5}
Fumio Hayashi

山 崎 悦 男^{*6}
Etsuo Yamazaki



ステータフィンはプロペラ後方の舵に設置してプロペラ回転流を回収する、高速・痩せ型船に適用可能な省エネ装置である。自動車運搬船を対象に、ステータフィンの設計と、理論計算及び模型試験による評価を行った。さらに、実船において、速力試験のほかに、信頼性及び性能の確認とステータフィンの基礎データ取得を目的としてフィンの応力計測、振動計測及び作動状況観察を実施した。その結果、省エネ効果のほか、強度・振動面で問題の無いことを確認した。当社建造の自動車運搬船では、ステータフィンが標準装備となりつつある。今後は、コンテナ船等、さらに高出力主機装備船への適用を検討していく。

1. はじめに

船舶における省エネは、運航コスト低減のみならず、最近では地球環境保護のためのCO₂排出量削減の見地からも、ますます必要とされ、船体形状の最適化のみならず、各種の省エネ装置の開発がなされている。

このような省エネ装置の中で、当社ではプロペラ前方に設置し、プロペラ回転流を回収して効率向上を図るリアクションフィンを開発し、タンカー等の低速・肥大船に装備して効果を上げてきた。さらに高速・痩せ型船にも適用可能な省エネ装置として、プロペラ後方の舵に設置するステータフィンの開発を行った。本報告では、ステータフィンの原理と設計、実船での検証について解説をする。

2. ステータフィンの原理

各種省エネ装置の中で、省エネ付加物は“船体抵抗や推進効率改善を目的としてプロペラの周辺に装備される装置”と定義される⁽¹⁾。省エネ付加物は、通常は船舶が航走することにより捨てられるエネルギーを何らかの方法で回収する装置で、回収すべきエネルギーに対応して下記に分類することができる。

- (a) プロペラ旋回流回収による効率向上を図る装置
- (b) プロペラ低荷重化による効率向上を図る装置
- (c) プロペラハブ渦拡散による効率向上を図る装置

ステータフィンは上記 (a) に含まれる。

ステータフィンの原理を図1に示す。ステータフィ

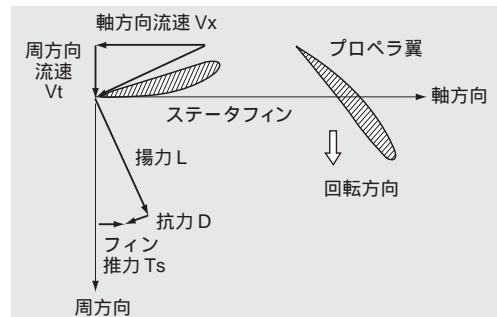


図1 ステータフィンの原理

ンには、プロペラにより加速された軸方向流速 V_x と周方向流速 V_t の合成流速 W が流入する。 W に対して適切な迎角を持たせることで、 W により発生する揚力 L と抗力 D の軸方向合成成分として推力 T_s が発生する。 T_s によりプロペラ発生推力の減少、すなわち、所要馬力の低減が可能になる。

当社ではプロペラ旋回流の回収を図る省エネ装置として、プロペラ前方に設置するリアクションフィンや二重反転プロペラ (CRP) を開発・実用化してきた。CRP は最も効率よく旋回流を回収できるが、複雑・高価なため一般には用いられていない。リアクションフィンとステータフィンは、CRP の前方又は後方プロペラを固定したもので CRP と比較して簡便・安価である。リアクションフィン自体は抵抗となるため、船尾の流れが遅く旋回流の回収効果に比して抵抗が小さい低速・肥大船に適用されてきた。流れが速く抵抗が大きくなる高速・痩せ型船には適用されていない。

^{*1} 技術本部長崎研究所船舶・海洋研究推進室主幹

^{*2} 技術本部長崎研究所船舶・海洋研究推進室主席

^{*3} 技術本部長崎研究所振動研究室主席

^{*4} 技術本部長崎研究所強度研究室主席

^{*5} 下関造船所船舶・海洋部計画設計課主席

^{*6} 長崎造船所造船設計部計画課主席

表1 TRANS FUTURE 3 主要目

長さ (m)	162.7
幅 (m)	25.0
深さ (m)	12.4
喫水 (m)	7.5
載貨重量 (t)	7893
主 機	8 UEC50 LSII
	15 700 PS × 127 rpm (MR)
	14 130 PS × 123 rpm (NR)
航海速度 (kt)	21.1

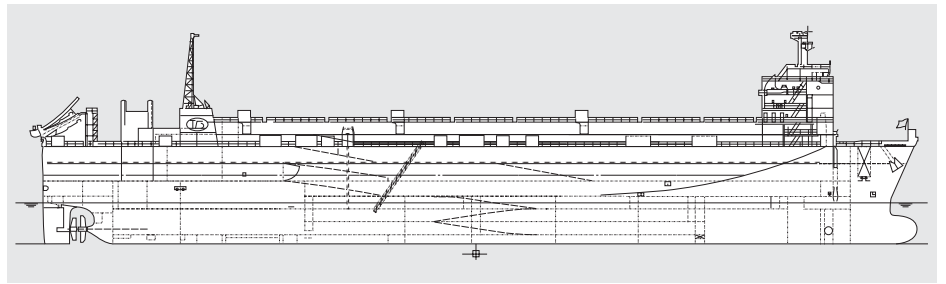


図2 TRANS FUTURE 3 一般配置図

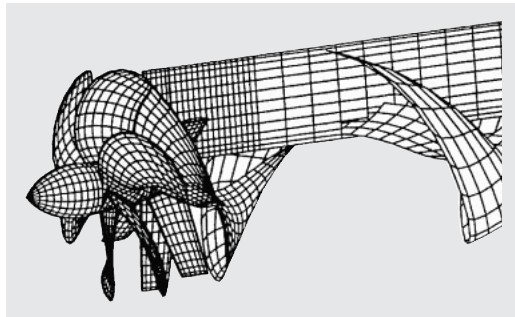


図3 プロペラ+ステータフィン解析モデル

ステータフィンはフィン自体が推力を発生するので高速・瘦せ型船での省エネ効果が期待できる。

3. ステータフィンの設計, 評価

自動車運搬船TRANS FUTURE 3を対象にステータフィンを設計し, 推進性能及び構造(強度・振動)の検討を行った。TRANS FUTURE 3の要目を表1に, 一般配置を図2に示す。

3.1 設 計

ステータフィンにより高い省エネ効果を得るには, フィンが有効な推力 T_s を発生する形状とする必要がある。図1より, ステータフィン全体が発生する推力 T_s は,

$$T_s = Z_s L = 1/2 Z_s W^2 C_L S / (1 + 1/AR)$$

ここで,

- Z_s : ステータフィン翼数
- C_L : 揚力係数
- S : 翼面積 (= $L_c \times L_s$)
- L_c : 平均翼弦長
- L_s : 翼幅
- AR : アスペクト比 (= L_s/L_c)

とあらわされる。揚力係数は翼型では迎角の関数であり上限がある。また, L_s はプロペラ半径より小さな値となるので, T_s を増すには翼弦長 L_c を増すか翼数 Z_s を増すのが有効である。実際には, 船尾のプロペラ周りの配置や製作の容易さを勘案して L_c と Z_s を

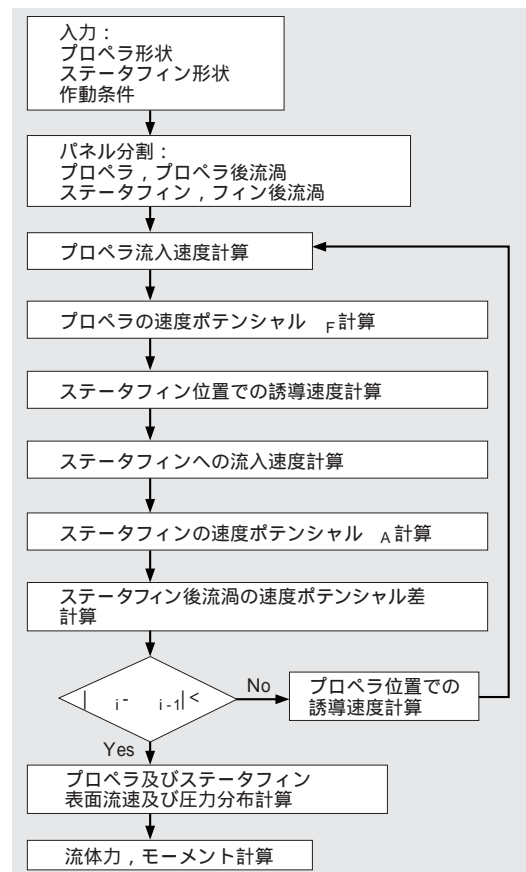


図4 プロペラ+ステータフィン解析フローチャート

決めることとなる。また, フィンに流入する流れはプロペラにより周期的に変動するので, 起振力を下げる見地から Z_s は前方プロペラ翼数と一致させないようにする必要がある。本船の場合, プロペラが6翼であるため, ステータフィンは9翼とした。さらに, フィンの設計には, フィンへ流入する流速 W の精度良い推定が不可欠である。そこで, 高精度パネル法を用いてステータフィンとプロペラを一体で解析する計算モデルを作製した⁽²⁾。このモデルでは図3に示すように, プロペラとプロペラの後流渦, ステータフィンとフィンの後流渦を微小パネルに分割し, 各パネル上の速度ポテンシャルを未知数として, 図4に示すフローチャートにしたがって, プロペラとステータの干渉問題として解く。この計算法により, フィンの最終形状を決

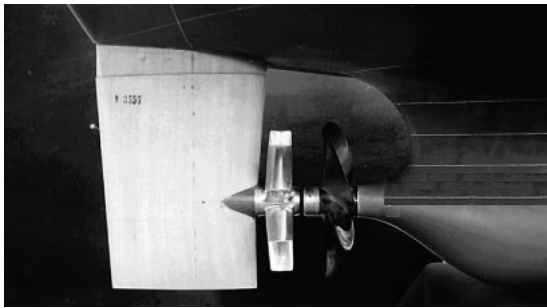


図5 模型試験でのステータフィン配置

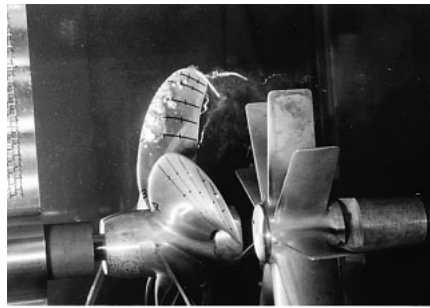


図6 キャビテーション試験

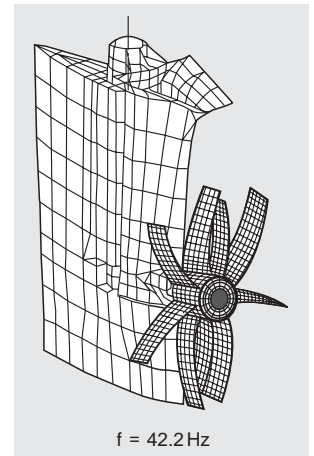


図7 ステータフィン振動解析

定した。

3.2 推進性能及びキャビテーション性能

設計したステータフィンの模型を製作して水槽試験で性能確認を行った。

まず、ステータフィンがある場合と無い場合、各々について抵抗・自航試験を実施して推進性能の評価を行った。図5にステータフィンが有る場合の試験配置を示す。試験の結果、ステータフィンによる馬力低減効果は約4%と評価された。

次にキャビテーション水槽にて、ステータフィンが有る場合のキャビテーション試験を実施した。喫水が最も浅い試運転状態で主機出力最大に対応した条件でのキャビテーション試験状況を図6に示す。ステータフィンには全くキャビテーションは発生せず、プロペラのチップボルテックスキャビテーションは、ステータフィンの外側を通過し、フィンには接触しないことを確認した。したがって、エロージョン等、キャビテーションによる損傷の恐れは無いものと判断した。

3.3 強度

ステータフィンの強度検討のために、水槽試験によってステータフィンの翼の基部に作用する応力を計測し、その結果から各フィンに作用する流体力、及びフィン全体に作用する流体力を求めた。この翼応力計測は、平水中直進時の他に、旋回を模した斜航時や波浪中についても実施した。

最大作用応力に対する許容応力 σ_{all} は、母材の降伏応力 σ_y を基に、安全率を考慮して定めた。水槽試験で計測された翼応力より、実船の翼の基部に作用する応力 σ を推定した。 σ は波浪中直進状態で最大となるが、平水中直進状態での定常成分 $\sigma / \sigma_{all} = 0.10$ と波浪中の変動片振幅 $\sigma / \sigma_{all} = 0.54$ より σ / σ_{all} は最大で0.64であり、許容応力の約1/3の余裕を有している。さらに変動応力に対する翼の基部の疲労強度、及びステータフィンの取付溶接部の強度を検討し、十分な安全率を有するように設計した。

3.4 振動

ステータフィンの防振設計を検討するために、ステ

ータフィンの振動特性の予測計算を実施した。先ず Taper Beam の簡略計算で初期検討を行った後、ステータフィンとラダー及びラダーホーンなどの近接構造を結合したモデルで詳細 FEM 計算を実施して確認を行った。

図7に詳細 FEM 計算結果を示す。水中でのステータフィンの固有振動数は、42.2 Hz となり、リアクションフィンの防振設計⁽³⁾ (固有振動数を $3.3 N_P Z$ 以上とする、 N_P : プロペラ回転数、 Z : プロペラ翼数) の基準を満たしている。

4. 実船試験

4.1 試験配置

実船に初めて適用されたステータフィンについて、通常実施する速力試験の他に、信頼性及び性能の確認とステータフィンの基礎データ取得を目的として、図8に示す試験配置で下記項目の計測を実施した。

- ステータフィンキャビテーション発生状況
- ステータフィン翼の基部の応力
- ステータフィン固有振動数

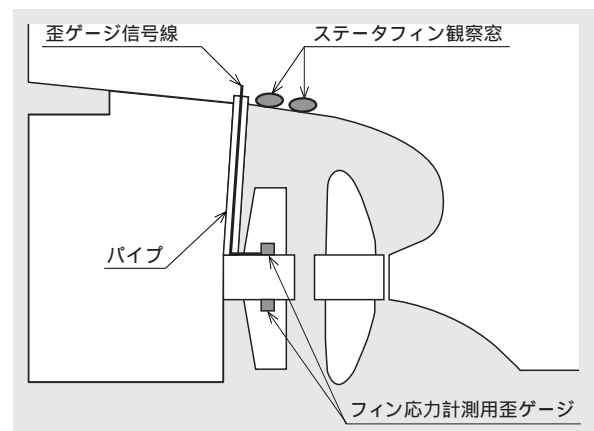


図8 ステータフィン実船試験配置

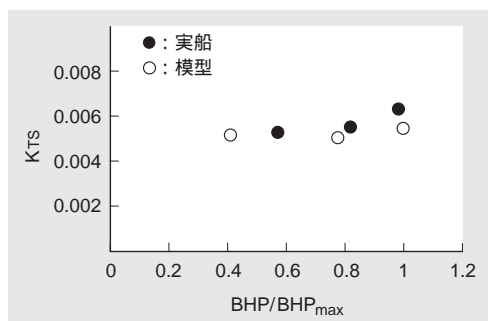


図9 ステータフィンが発生する推力



図10 実船キャビテーション観察結果

4.2 推進性能

ステータフィンの各翼に作用する荷重 F_i がステータフィンの半径の60%の位置に作用すると仮定し、翼根応力 σ_i から F_i を求めた。各翼の荷重 F_i を用いてステータフィンの推力 T_s を算出し、無次元推力係数 K_{Ts} ($= T_s / \rho N_p^2 D_p^4$; ρ : 海水密度, D_p : プロペラ直径) として、主機出力BHPに対してプロットして図9に示す。模型と実船は良い一致を示しており、実船においても模型試験と同様の馬力低減効果が達成されたと評価できる。

4.3 キャビテーション観察

図10に実船のステータフィンのキャビテーション発生状況を示す。最も水面に近いNo.9翼のみ間欠的なチップボルテックスキャビテーションが発生し、他の翼には発生していなかった。また、プロペラのチップボルテックスキャビテーションは、ステータフィンの外側を通過しており、フィン翼端には接触していない。実際の運航では、試運転状態より喫水が深くなることも合わせて考慮すれば、本船のステータフィンにキャビテーションによるエロージョンの発生は無いものと判断される。

4.4 強度

試運転で計測された翼の基部に作用する応力の定常成分は、最大で $\sigma_{all} = 0.11$ で、水槽試験からの予測値 $\sigma_{all} = 0.10$ に近い値となっており、模型試験結果は十分な精度を有していると評価される。

4.5 振動

空中及び水中でのハンマリング試験結果を図11に示す。水中でのステータフィン翼の固有振動数は45.8 Hzで3.3 N_z以上という条件を満たしている。また、海上運転での計測では固有振動数は46 Hzで、翼根応力は小さく過大振動が発生していないこと、すなわち、共振回避できていることが確認された。

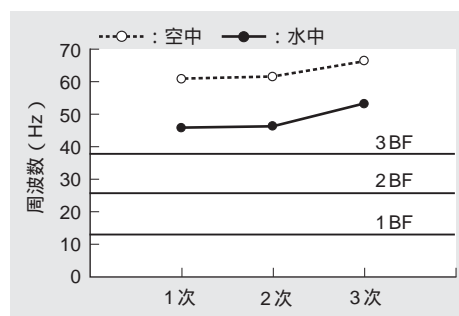


図11 ステータフィン翼の固有振動数

からも理論計算及び模型試験で検討を行い、ステータフィンを初めて装備した自動車運搬船で検証のための実船試験を行った。その結果、ステータフィンは予想通りの省エネ効果を発揮し、かつ、強度・振動でも問題が無いことが確認された。本船装備後、当社建造の自動車運搬船ではステータフィンが標準装備となりつつある。今後は、コンテナ船等、更に高出力主機装備船への適用を検討していく。

参考文献

- (1) 用語解説5, 省エネ付加物, 関西造船協会, らん第48号(2000)
- (2) 川北千春ほか, 後方ステータ付きダクトプロペラのパネル法による単独計算, 西部造船会会報 第96号(1998)
- (3) 阪井大輔ほか, リアクション・フィンの信頼性に関する研究, 西部造船会々報 第76号(1988)



星野徹二



大島明



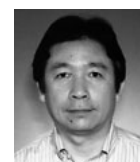
藤田一誠



黒岩隆夫



林文夫



山崎悦男

5.まとめ

プロペラ後方に設置する省エネ装置であるステータフィンについて、推進性能に加えて構造面(強度・振動)