



平成30年度（2018年度）

ゲートラダーを使用した省エネ推進システムの技術開発
成果報告書

平成31年（2019年）3月

一般社団法人 日本船用工業会

はしがき

本報告書は、BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて、平成 29 年度（2017 年度）、平成 30 年度（2018 年度）の 2 年計画で、一般社団法人日本船用工業会がセイブン株式会社に委託して実施した、「ゲートラダーを使用した省エネ推進システムの技術開発」の 2 年間の成果をとりまとめたものである。

ここに、貴重な開発資金を助成いただいた日本財団、並びに関係者の皆様に厚く御礼申し上げる次第である。

平成 31 年（2019 年）3 月
（一社）日本船用工業会

目 次

第 I 部 平成 29 年度	1
1. 事業の目的	1
2. 事業の目標	2
2.1 本事業の最終目標	2
2.2 平成 29 年度の目標	3
3. 事業計画	3
4. 先行技術開発	3
4.1 ゲートラダーのコンセプト設計	3
4.1.1 推進性能向上	3
4.1.2 操縦性能向上	8
4.2 コンセプトの検証	9
4.2.1 水槽試験結果による推進性能の検証	9
4.2.2 MMG モデルの開発と数値モデルによる操縦性能の検討	12
4.2.3 水槽試験結果による操縦性能の検証	13
4.2.4 水槽試験による波浪中抵抗増加低減の検証	15
4.2.5 数値計算によるキャビテーションとプロペラ起振力の検討	17
4.2.5.1 流場改善効果	17
4.2.5.2 キャビテーション発生量低減効果	18
4.2.5.3 プロペラ起振力低減効果	19
5. 平成 29 年度の実施内容	20
5.1 試験対象船	20
5.2 ゲートラダーの設計/製作	21
5.2.1 ゲートラダーの設計	21
5.2.2 ゲートラダーの製作	24
5.3 ゲートラダー用船尾の設計/製作	25
5.3.1 船尾骨材の設計/製作	26
5.3.2 船尾ブロックの設計/製作	27
5.3.3 操舵機台等の設計/製作	27
5.3.4 操舵機室配置図	28
5.3.5 操舵機室内油圧配管等の設計	28
5.4 ゲートラダー制御装置の設計/試作	28
5.4.1 新規型式追加	28
5.4.2 追加機能	30
5.4.3 開発・出荷検査方法	35
5.5 ゲートラダー操舵機の製作	35
5.6 ゲートラダー搭載	36
5.7 実船試験（海上試運転）	38

5.7.1	速力試験結果	38
5.7.2	操縦性能試験結果	41
5.7.2.1	操縦特性の概要	41
5.7.2.2	Z試験概要	43
5.7.2.3	Z試験結果	44
5.7.2.4	スパイラル試験	47
5.7.2.5	スパイラル試験結果	48
5.7.2.6	オートパイロット保針結果	50
5.7.2.7	微速前進（クラビング）モード結果	53
5.7.2.8	旋回性能試験結果	53
5.7.2.9	停船性能試験結果	57
5.7.3	船内騒音・船体振動計測結果	57
5.7.4	操舵トルク計測結果	59
6.	目標の達成状況	60
7.	今後の予定	60
8.	まとめ	60
第Ⅱ部	平成30年度	62
9.	平成30年度の目標	62
10.	事業計画	62
11.	平成30年度の実施内容	62
11.1	試験対象船	62
11.2	航海記録の収集と同型船との比較	63
11.3	オンボード計測	69
11.4	軸馬力計の取り付けと馬力計による計測	77
11.5	操舵時の馬力計測	79
11.6	オフセット舵角の最適化	80
11.7	制御装置のチューニング	81
11.7.1	東京から大阪への結果（2018/09/09）	82
11.7.2	大阪から東京への結果（2018/09/14）	86
11.7.3	微速前進（クラビング）モードの結果	90
11.7.4	制御装置の基本性能に関するまとめ	90
11.8	操縦性能の確認	91
12.	目標の達成状況	93
13.	ダクトプロペラの歴史から見たゲートラダーへの期待	95
14.	今後の予定	98
15.	まとめ	98

第 I 部 平成 29 年度

1. 事業の目的

近年、船舶から排出される温室効果ガス（GHG）について地球温暖化防止の面から規制が進められ、IMO で制定された船舶のエネルギー効率設計指標（EEDI）は 2013 年以降、段階的に規制強化されており、今後ますます EEDI は船舶そのものや船舶設計のラベル化を促進し、燃費性能による船舶やその設計の差別化が進むと予想される。船舶や船舶設計を取り巻く燃費性能改善に対する要求は非常に高く、燃費向上につながる推進性能向上に関してこれまで多くの技術開発が進められてきており、今後もその歩みを止めることはできない状況にある。

これまでに実施されてきた船舶推進関連の省エネ技術には、

- ①船体抵抗低減…空気潤滑システムや新しい船首形状の開発
- ②自航要素改善…各種船尾フィンあるいはダクト等の省エネ付加物開発
- ③プロペラ単独効率改善…羽根形状の改善による高効率プロペラの開発
- ④プロペラ荷重度低減…二重反転プロペラ（同軸型、タンデム型）の開発、ツインステグ船型の開発
- ⑤プロペラ後流ロスの回収…プロペラ・ボス・キャップ・フィン、ターボリング、あるいは舵板装着フィンの開発

などが上げられるが、舵抵抗そのものに着目した研究開発はこれまであまり見られない。

現在、広く採用されている高揚力舵を含む通常舵はプロペラ後流中に置かれているため、舵の存在が船体抵抗となっている。この舵抵抗の改善と船尾フィンなどのような省エネルギー付加物としての特徴を兼ね備えた、操縦性能は通常舵と同等の新しい省エネルギー型特殊舵として、ゲートラダーのプロトタイプとなる「フレーム舵の調査研究」が平成 24 年度 F S 事業において実施された。しかし試作されたフレーム舵を装備した 499GT 型内航貨物船の海上試運転結果や就航状況などから、期待どおりの性能は得られなかった。その原因として、フレーム舵が通常舵と同様に舵板が 1 本の舵軸で支えられていたことと、舵板配置がプロペラ後流中に置かれていたことが原因と考えられた。そこで上述の原因をあらたなコンセプトデザインのもとに、推進性能と操縦性能が向上するゲートラダーを開発することとなった。

ところで船舶の操縦性能を向上させるための高揚力を発生する特殊舵としてこれまでにいくつかのものが実用化されているが、主なものとして次のものがあげられる。

- A) フィッシュ・テール舵
- B) ベック・ツイン舵
- C) フラップ舵

しかし、フィッシュ・テール舵やベック・ツイン舵は操縦性が良いものの、舵断面形状やプロペラ後流中に二枚の舵が存在する点で船舶の燃費性能が向上しにくいというデメリットがある。一方、フラップ舵は操縦性が良くしかも舵面積を小さくできるため燃費性能は通常舵とほとんど変わらないメリットもあるが、プロペラ後流中に構造が複雑な舵板を配置するためそのメリットが少なくなるというデメリットがある。

今回開発するゲートラダーは、独立した 2 本の舵軸で、プロペラの左右舷両側に頂板と舵

板で構成される逆L字型2枚の舵を対向させて配置するもので、それぞれの舵板は内側に反りを持たせた翼型で構成されていることを特徴とする新形舵(2015年11月:特許第5833278号登録、米国、中国、韓港、欧州へのPCT手続きによる国際特許申請中、登録商標申請中)である。ゲートラダーの各舵は通常舵と同様、それぞれの操舵機により操作するが、その形状、構成から下記のような特徴が生まれ、他国の追随を許さない技術を目指す。

1)ゲートラダーは上述のように左右舷の各舵板の断面は翼形状を形成しているため、舵板の内側(プロペラ側)と外側(反プロペラ側)では流速に差が生じ、微小な舵角でも流入して来る流れに対して各舵板には内向きの揚力が発生する。ゲートラダーには斜めに流速が流入するので揚力はやや前方向きに発生し、その軸方向成分が推力として寄与すること(ダクト効果)により、通常舵装備船より推進性能が向上する。また、このダクト効果は静穏な海象より荒天時の方がより顕著で、荒天時の効率低下度が改善される。

2)ゲートラダーの左右の舵板を適切な舵角で組み合わせる(例えば一方の舵板を船体中心に対し約 100° とし、他方の舵板を約 70° とする)ことにより、各舵板がフラップ舵のような配置となり、微速前進時の横力が増大して離着棧性能が通常舵よりも向上する。

3)一般にプロペラ翼の背面側では負圧領域となり、海水中の細かな気泡が成長して翼表面にキャビテーションと呼ばれる空洞現象が生じる。船尾の不均一な流れの中におかれるプロペラでは、この船尾伴流の影響により一回転中に非常に大きなキャビテーションの変動が生じ、船体振動の大きな原因となる。しかしゲートラダーを装備することにより、舵板の翼の働きにより舵板内側の流れは加速される(整流効果)ので、プロペラ周囲の不均一な流れが改善され、プロペラ・キャビテーションの大きな変動が抑制され、船舶の騒音、振動の軽減につながる。

しかしゲートラダーが配置される船尾流場は、流体の粘性影響により、実船と模型船とでは大きく異なる。この影響は一般的に尺度影響と呼ばれ、模型と実船の相関係数などにより経験的に補正されている。ゲートラダーはこのような模型船と大きく異なる船尾流場に配置されるため、その性能面や構造面の不明点も多く、模型試験データのみで実用化を進めることが難しいため実機試作と実船試験が不可欠である。

そこで、本事業ではこれまでに蓄積された水槽試験結果をもとに実機ゲートラダーを試作して実船に搭載し、実船試験(海上試運転)でその有効性、実用性を明らかにし、省エネ付加物の機能を兼ね備えた世界初の新型舵・ゲートラダーが船型計画の自由度向上や実海域に応じた新たな省エネ推進システムの実現に寄与できることを示すこととした。

2. 事業の目標

2.1 本事業の最終目標

- 1) 省エネ推進システム装備船では、通常舵装備船と比較して実海域における推進性能を5%改善し、船内振動レベル、騒音レベルを3dB低減させる。
- 2) 微速前進時の操縦性を通常舵より向上させる。
- 3) 実航海中でのゲートラダー制御装置の操作性、機能性、直感性(ユーザーフレンドliness)を通常舵と同等以上にする。

2.2 平成29年度の目標

- 1) 2450 総トン型コンテナ船（全長約 111m）を試験対象船としてゲートラダーを設計/製作し、旋回性能と保針・変針性能に関する IMO 基準を満足させる。
- 2) 試験対象船の通常舵と同等以下の操舵機（操舵機トルク 17t-m 以下）を使用できるよう、ゲートラダーの舵トルクを押さえる。
- 3) ゲートラダー用操舵機 2 式が搭載できるよう船尾構造を設計する。

3. 事業計画

4. に述べる先行技術開発の成果をもとに、平成29年度にゲートラダーの試作、ゲートラダーの実船搭載を行い、海上試運転を実施する事業計画を立てた。事業計画表を表 3-1 に示すが、この予定どおりに事業は進捗した。

表 3-1 平成29年度事業計画

実施項目	平成29年度			
	1 / 4	2 / 4	3 / 4	4 / 4
1) ゲートラダーの設計/製作	←→			
2) ゲートラダー用船尾の設計/製作	←→			
3) ゲートラダー制御装置の設計/試作	←→			
4) ゲートラダー操舵機の製作	←→			
5) 実船試験 (海上試運転・各種計測・解析)			←→	
6) 報告書作成				←→

4. 先行技術開発

4.1 ゲートラダーのコンセプト設計

4.1.1 推進性能向上

船舶の舵は常に操縦性の観点から設計され、推進性能への影響が分かってきたのは、ここ最近である。しかしながら、舵は常に推進性能にとって抵抗の一部であり、操縦性の向上と推進性能の向上は相反する場合はほとんどと言って良い。特に、内航船のように港湾に頻繁に出入りするような船舶には高揚力舵と呼ばれる特殊な形状の舵が使用され、それは揚力も大きいと同時に抵抗も大きくなるという宿命にあった。

ここで開発するゲートラダーは、このような舵の問題点を解決する目的で開発され、舵としての操縦性の向上はもちろん、同時に推進性能も改善するという、これまでにない大きな目標が設定された。

一方、船の推進性能は、直接的に運航費に影響を与えること、燃料油の価格が大幅に高

騰したこと、EEDI などの環境指標への対応とこれまで以上の多くの研究者が研究開発を進めてきたことから、船尾周りの推進装置などでは、船の推進性能の大幅な改善は期待できないというのが通説となっていて、本研究開発は、これまでの通説を覆す努力と発想が必要であった。

そこで、ゲートラダーの開発に対しては、推進性能の改善という従来からの発想をやめて、エネルギー損失の実態調査、その回収と言う観点から実施した。

具体的には、船の損失を、図 4-1-1-1 のように損失馬力と言う形で線形化し、船の粘性抵抗回収の実態に着目した。

Visualization of Energy Loss

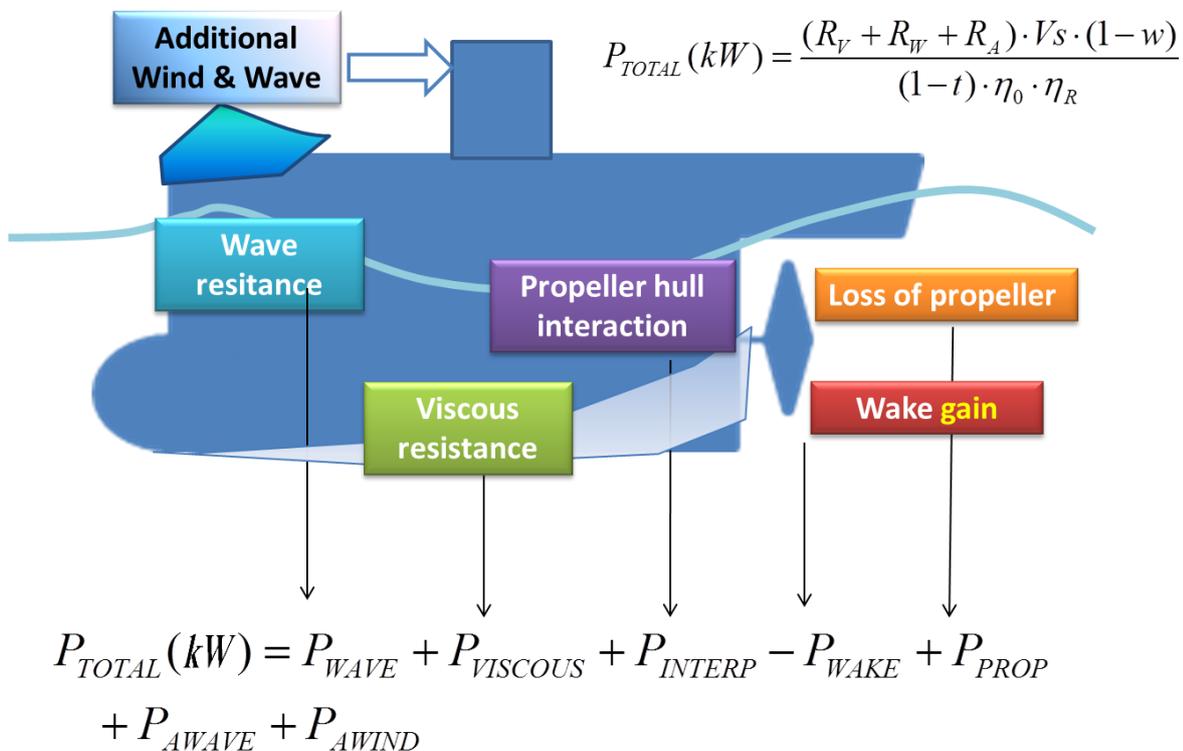


図 4-1-1-1 エネルギー損失の見える化^{*1}

その結果、図 4-1-1-2 に示されるようにタンカー船型に比べて、コンテナ船型の粘性エネルギー回収が少ないこと、その原因が図 4-1-1-3 の伴流分布の違いにあることに着目し、新しい概念である Elementary Propulsive Efficiency (EPE) という形で、舵をも一体とした推進装置としての推進効率の向上を目指すこととした。

¹ N.SASAKI、「新しい船舶の CO2 排出低減技術」、海事 3 学会合同、第 2 回超省エネ船シンポジウム、2011.7

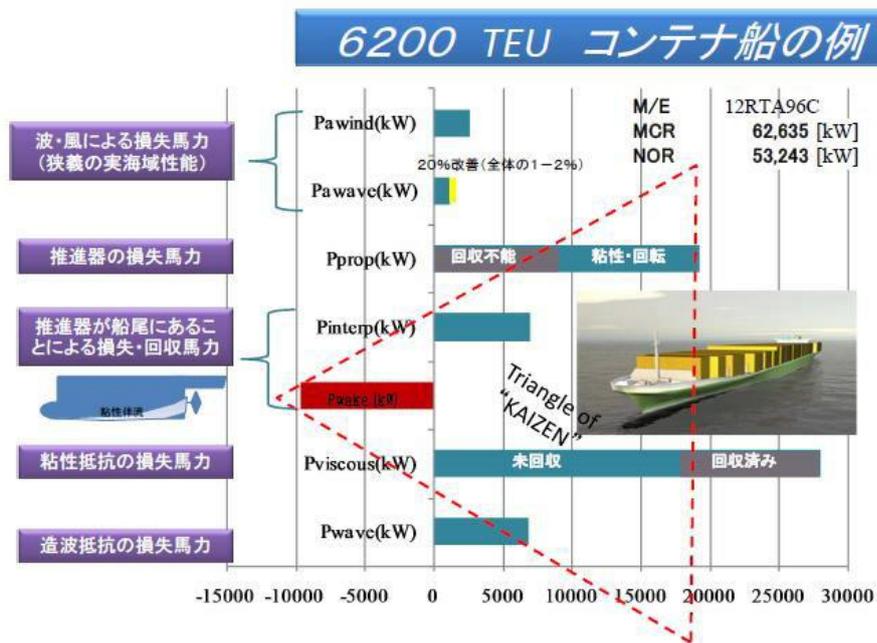
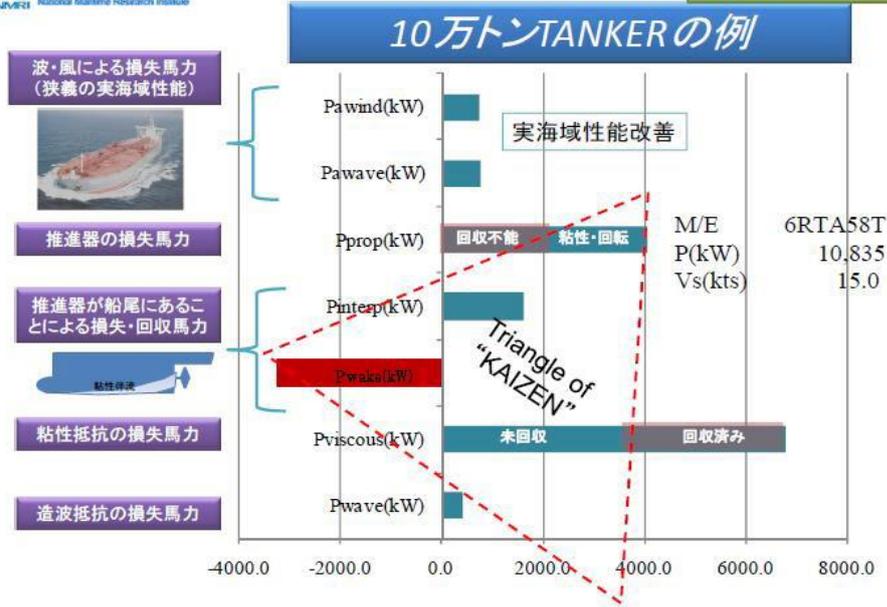


図 4-1-1-2 タンカーとコンテナの粘性抵抗損失回収率の違い^{※2}

² N. SASAKI、「新しい船舶の CO2 排出低減技術」、海事 3 学会合同、第 2 回超省エネ船シンポジウム、2011.7

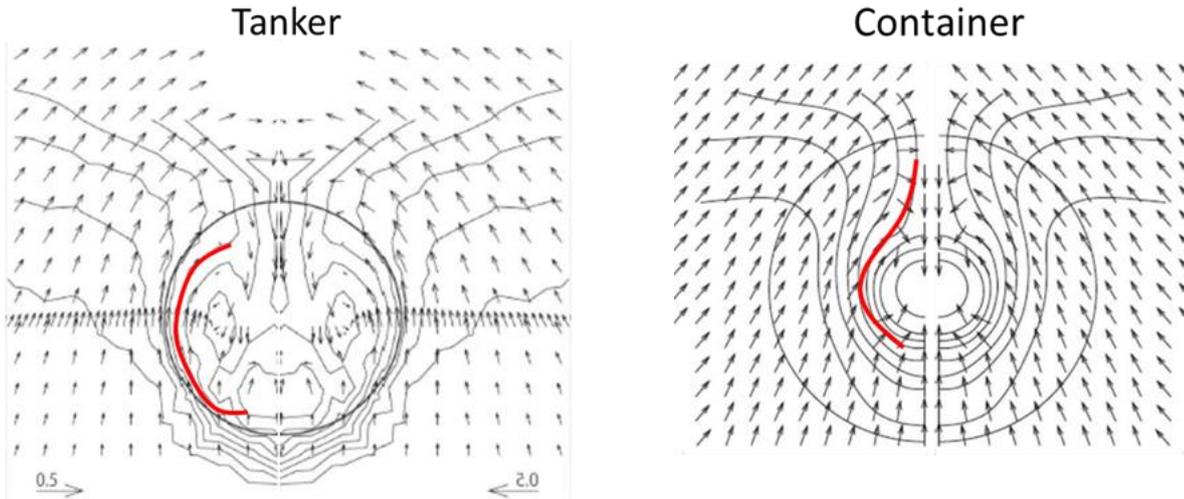


図 4-1-1-3 タンカーとコンテナ船の伴流分布の違い^{※3}

推進効率の定義は、 η_r を無視して、

$$\eta = \eta_p \cdot \frac{1-t}{1-w} = \frac{2\kappa}{1+(1+C_T)^{0.5}} \cdot \frac{1-t}{1-w}$$

であるが、この3つの要素（ t ：スラスト減少係数、 C_T ：プロペラ荷重度係数、 w ：伴流係数）が意味するところは、

- (1) できるだけ推力密度を下げる
- (2) できるだけ船体との水平距離を大きくする
- (3) できるだけ、粘性伴流のある場所に配置する

であり、キャビテーションによる損傷、振動や騒音を避けるなら大型のダクトプロペラがこの候補となりうる。また、上記の推進効率は、推進器が円形で無くとも良く、また空間的に離れていても良い。

このようなコンセプトを追求すると、図 4-1-1-4 のような分離型のダクトプロペラが候補となった。これに、舵としての機能を追加して、現状のゲートラダーが設計されている。

³ 鈴木、佐々木、川村「船体抵抗と推進」成山堂書店

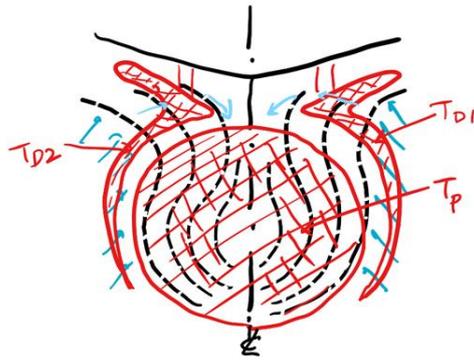


図 4-1-1-4 EPE を意識したダクトプロペラ

EPE の改善を意識したゲートラダーは図 4-1-1-4 に示すとおり、従来舵抵抗であった舵に作用する流体力を舵推力に変えるためダクト効果を利用している。図 4-1-1-5 は、大きな曳航力を必要とする AHTS (Anchor Handling Tug and Supply vessel) など採用されているダクトプロペラが大きな曳航力 (推力) を発揮する原理を示している。ダクトプロペラの場合、船尾の曲がり流れによりノズルとして示されている翼型周りに速度差が生じ、その結果として得られる揚力 (F_1) の前進方向成分 (F_3) が推力として寄与する。

ゲートラダーの場合、ダクトの位置に翼型を有する舵板が配置されるので、通常舵には生まれぬ推力が舵板に発生して EPE の改善が可能であることを示している。また、ゲートラダーの内部の流れは加速されて EPE の改善に寄与している。この点がフレーム舵から変更された重要なコンセプトの一つである。

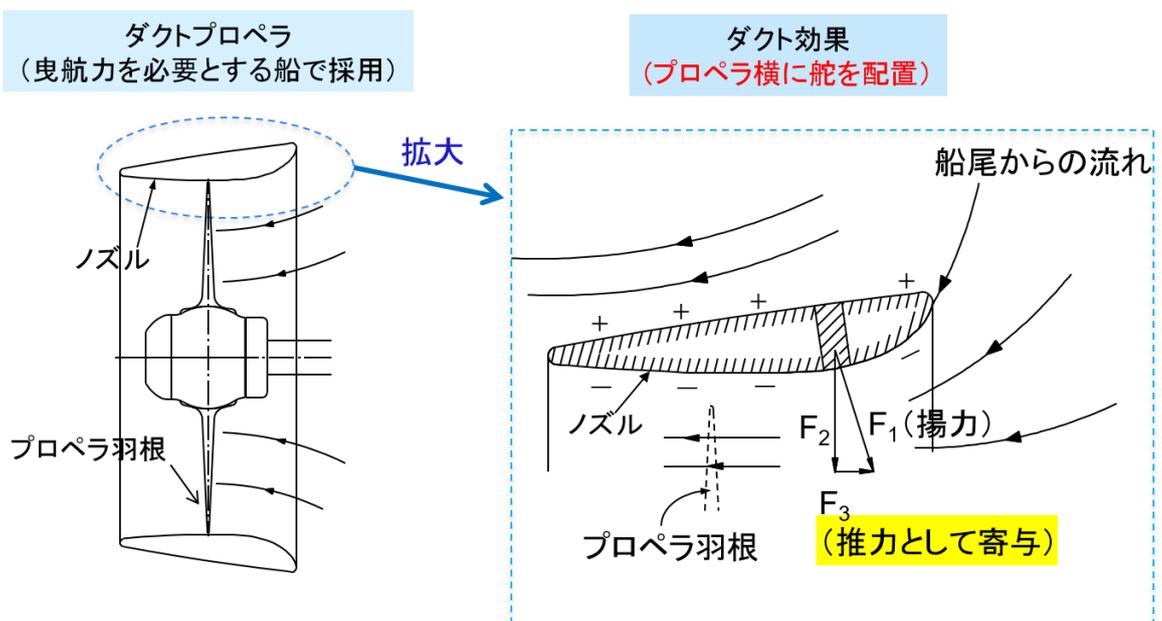


図 4-1-1-5 ノズル効果によるゲートラダーの推力寄与

4.1.2 操縦性能向上

4.1.1 で述べたように、ゲートラダーの設計では推進効率だけでなく、操船能性の向上についても検討が加えられた。フレーム舵では舵軸が1本であったため2枚の舵板の相対位置は常に変わらなかったのに対し、ゲートラダーでは舵軸を2本として、左右舷の舵板を独立して作動させることにより、操縦性能向上を図るアイデアが生まれた。

図4-1-2-1に、右舷後方からみたゲートラダーの搭載イメージを3次元(3D)モデルで示す。

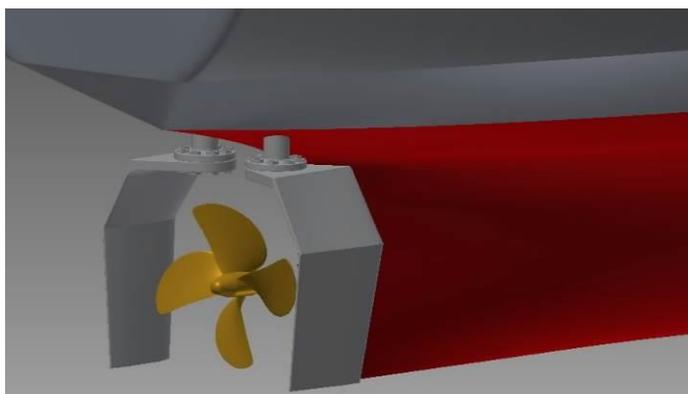


図4-1-2-1 舵軸2本のゲートラダー3Dモデル

図4-1-2-2は、この3Dモデルにおいて各種操舵モードにおける舵板の動きを、船底側からゲートラダーを見上げた図で示したものである。左右舷の舵板の組み合わせにより、ゲートラダーの働きが大きく変わる。

図4-1-2-2の左上から右下に向かって、下記のとおり操縦運動をイメージしている。いずれも検討段階でのイメージ操舵である。

- 1) 左端上：Economy Mode…通常航走状態
- 2) 中央上：Rough Sea Mode…荒天時航走状態
- 3) 右端上：Steering Mode…通常旋回状態
- 4) 左端下：Circle Mode…低速旋回状態
- 5) 中央下：Crash Stop Mode…急速停船状態(停船補助機能)
- 6) 右端下：Crabbing Mode…離着棧状態(バウ・スラスト併用による横移動機能)

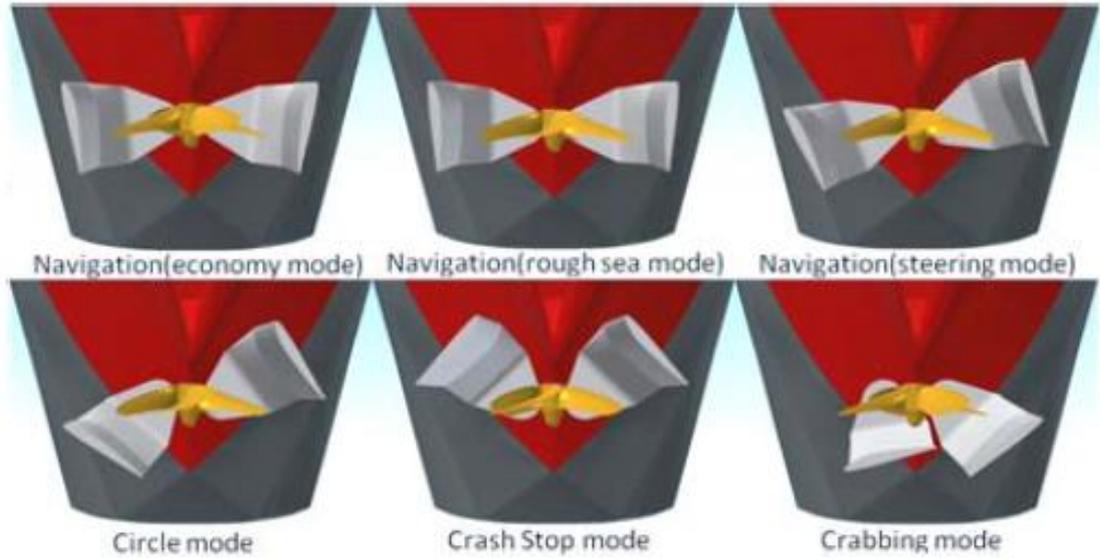


図 4-1-2-2 ゲートラダーの操舵システムの各種モード（コンセプト検討時）

上記のコンセプト設計により、開発されるゲートラダーはこれまでの特殊舵との比較において図 4-1-2-3 のような位置づけとなる。

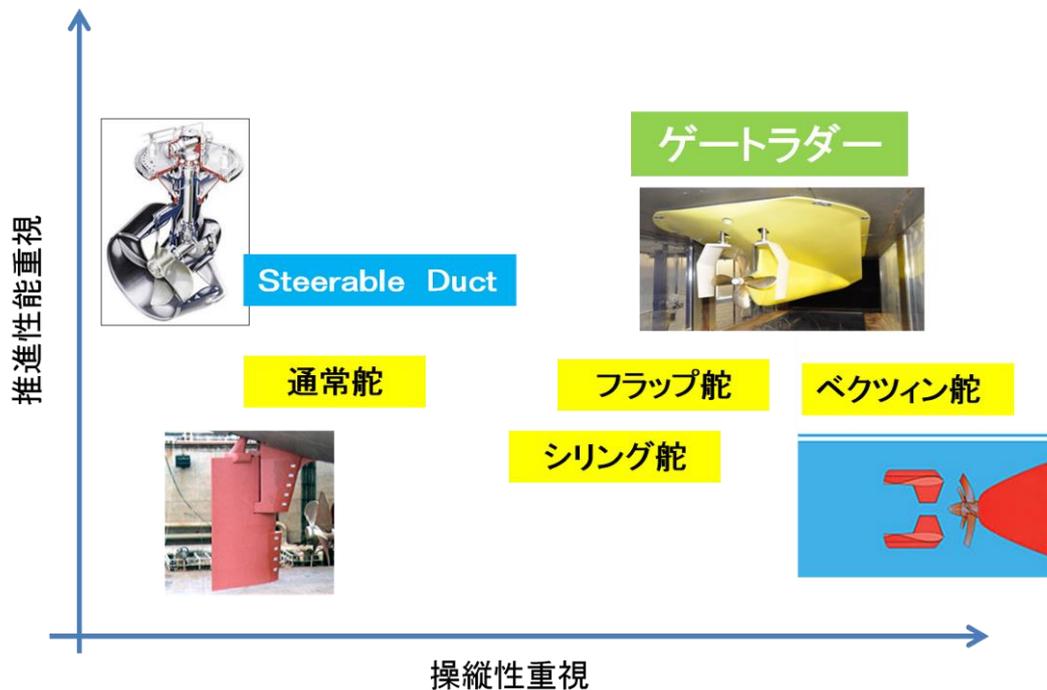


図 4-1-2-3 ゲートラダーのコンセプト位置づけ

4.2 コンセプトの検証

4.2.1 水槽試験結果による推進性能の検証

推進性能のコンセプト検証で実施された水槽試験結果を 3 例示す。

1 番目の例はニューキャッスル大学での空洞水槽における通常舵とゲートラダーに作用

する流体力計測結果である。図 4-2-1-1 に試験装置配置図を、また図 4-2-1-2 に試験結果を示す。

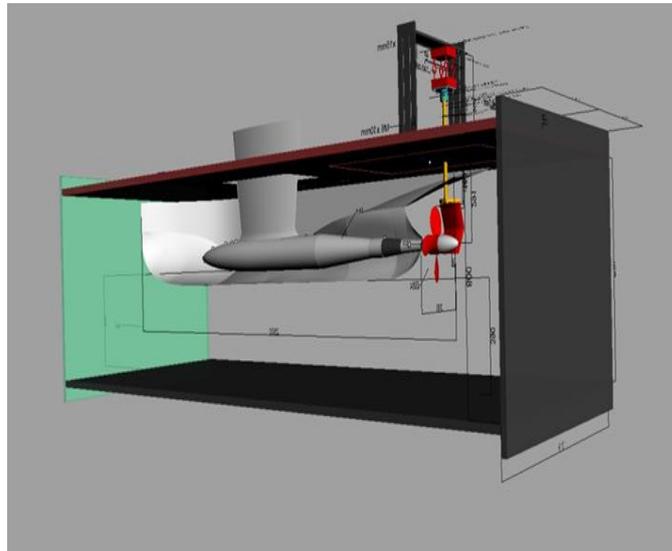


図 4-2-1-1 空洞水槽における舵流体力計測試験装置配置図

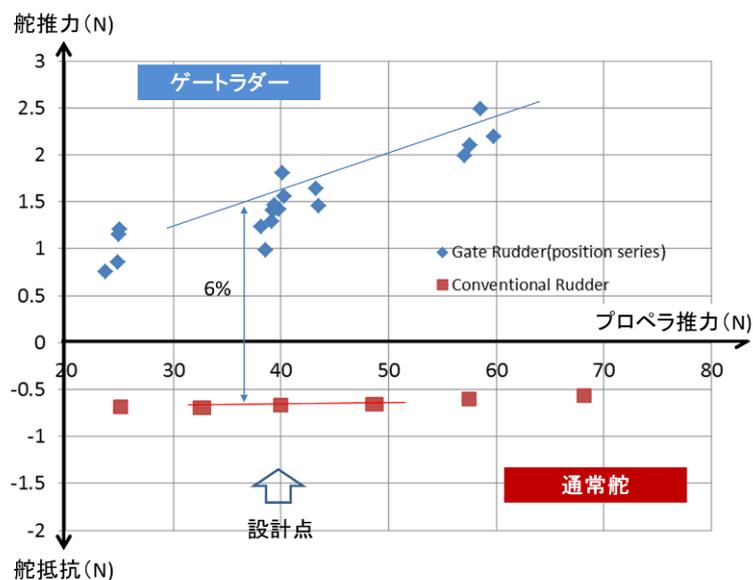


図 4-2-1-2 舵流体力計測結果

図 4-2-1-2 より、プロペラの推力が大きくなるほどゲートラダーの舵推力が大きくなり、通常舵の舵抵抗が無くなることを示された。その差はプロペラ推力の 6%に相当している。

2 番目の例は、ゲートラダー船型 ($L_{pp} \times B \times d = 300\text{m} \times 65\text{m} \times 17.9\text{m}$) の 6m 大型模型による水槽試験を海上技術安全研究所第 2 水槽 (400m \times 18m \times 8m) で実施した結果である。そこで得られた舵推力の計測例を図 4-2-1-3 に示す。

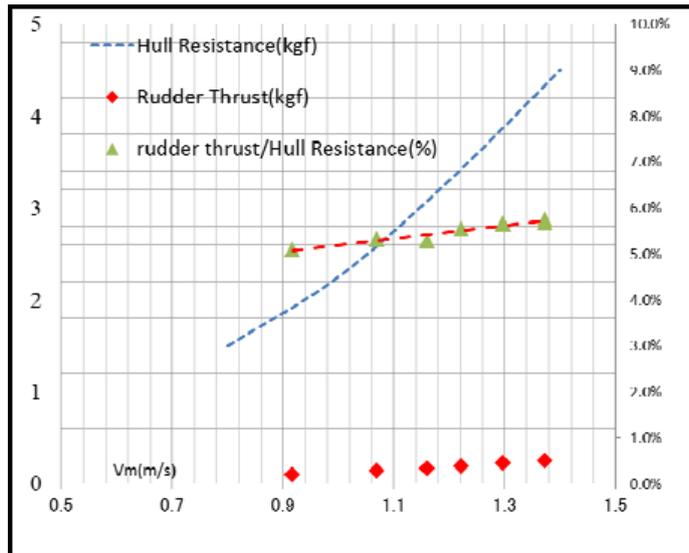


図 4-2-1-3 大型模型船によるゲートラダー舵推力計測結果

ここでも舵は抵抗ではなく推力を発生していることに注目する必要がある、その量は船体抵抗の 5~6% (右縦軸目盛) にも達する。従来の方法を用いた馬力計算結果では、この抵抗低減量がほぼ省エネ量に相当している。

3 番目の例は、比較的痩せ型で設計フルード数が高い 499GT 型内航船に対してゲートラダーの適用性を調査した試験結果である。内航船の場合、コスト的な制約もあり、回流水槽を用いて水槽実験を実施する機会が多く、回流水槽の乱れを考慮しても境界層外にある舵表面の流れは層流状態となるので、これを防止するために図 4-2-1-4 に示す乱流促進装置を用いて抵抗試験、自航試験を実施した。水槽試験は西日本流体技研で実施した。

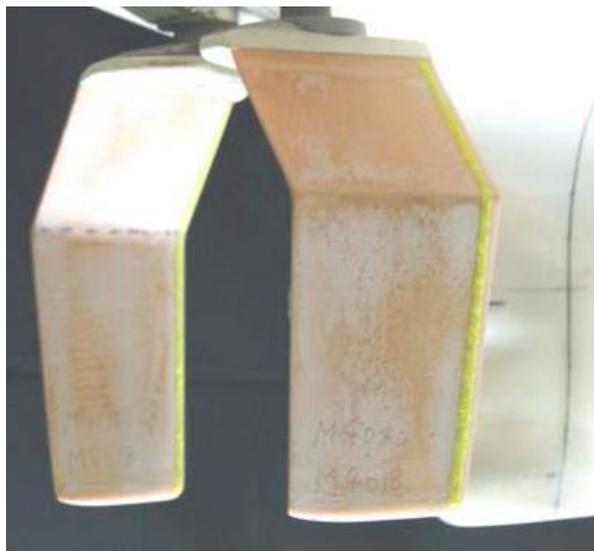


図 4-2-1-4 ゲートラダーの乱流促進装置

図 4-2-1-5 に水槽試験結果から得られたデータをもとに作成された馬力計算結果を示

す。3.5～5%の燃費改善（右縦軸）になっているが、高速になるほど改善量が増加しているのはやはりゲートラダー模型のレイノルズ影響が考えられ、実船での省エネ効果はもう少し大きいのではないかと推察される。

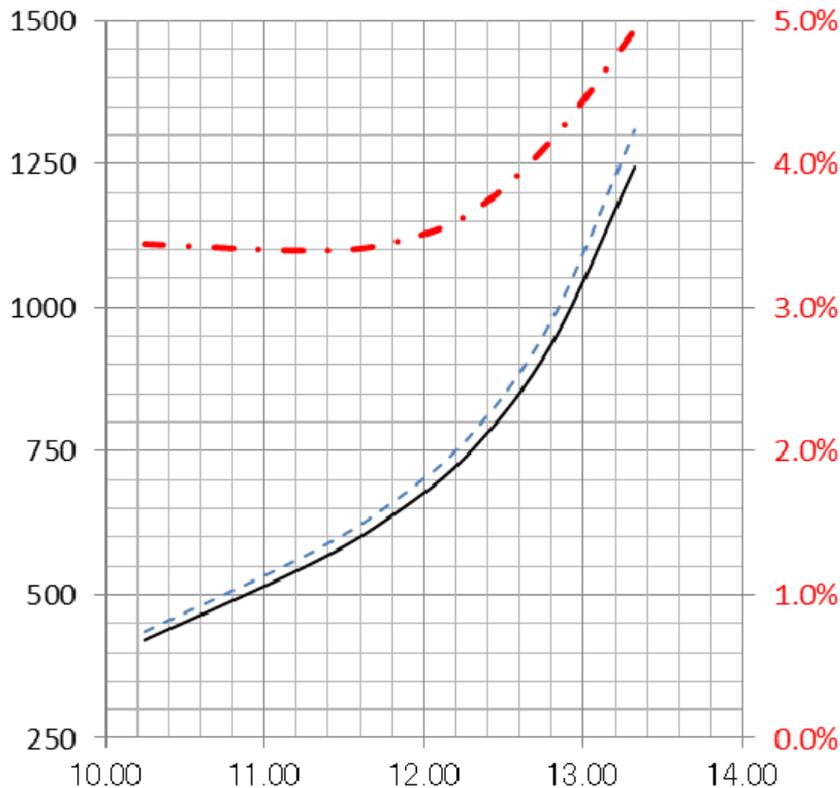


図 4-2-1-5 馬力計算結果

4.2.2 MMG モデル^{*4}の開発と数値モデルによる操縦性能の検討

操縦運動のシミュレーションにおける舵力の推定には、MMG モデルに代表されるような運動量理論に基づく簡易的な推定法が良く利用される。舵について簡易的な計算法が非常に実用的である。次に示すゲートラダーと通常舵との違いを整理して、図 4-2-2-1 に示す舵流体力の計算モデルを作成し、各領域での舵力を計算することとした。

- (1) ある程度の大舵角にならないとゲートラダーの舵面がプロペラ後流に入らない
- (2) 左舷と右舷の舵が別々に作動するので、舵の流体力も2つの舵の合力となる
- (3) 舵を前方に操舵する場合は、船体との干渉が大きくなり、舵単独の性能と大きく異なってくる

⁴ 日本造船学会の「操縦運動の数学モデル検討グループ(Maneuvering Modeling Group)」で作成された船舶の操縦性に関する数学モデル

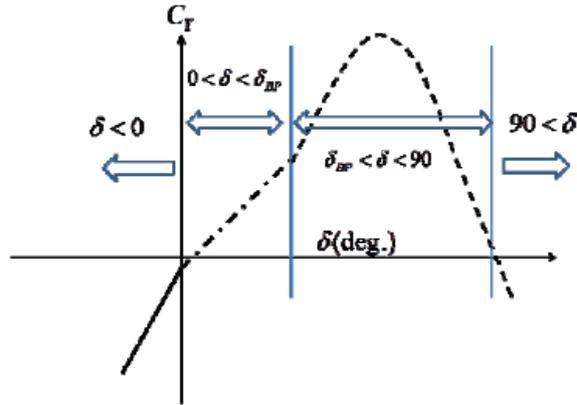


図 4-2-2-1 ゲートラダーの横力計算モデル

通常舵装備船によく用いられる MMG モデルによるシミュレーション計算にこの計算方法によるゲートラダーの流体力を用いて、ゲートラダーを装備した船型の操縦性を計算した。

斜行中の船体に装備されたゲートラダーの舵力を推定して、Zig Zag 試験(Z 試験)のシミュレーション結果の一例を図 4-2-2-2 に示すが、このシミュレーション結果から通常舵としての操縦性に問題がないことを確認した。

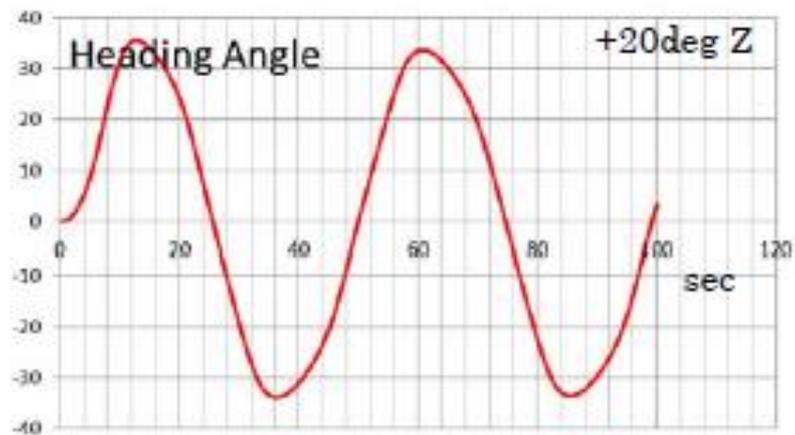


図 4-2-2-2 ゲートラダー装備船の Zig Zag 試験シミュレーション結果

4. 2. 3 水槽試験結果による操縦性能の検証

操縦性能のシミュレーション結果の検証を目的に、九州大学の船舶運動性能試験水槽でゲートラダーと通常舵を装備した 2.5m の模型船(499GT 型内航貨物船)を使用して操縦性能試験を実施した。模型船用操舵機が 1 軸しかないため、ゲートラダーは片舷のみの操舵による検証となった。

図 4-2-3-1 に旋回性能の試験結果とシミュレーション計算結果の比較を示す。初期状態では両舷とも +30° の舵角を取っておき、左舷舵へ左 35° の舵角指示からの旋回の様子を示している。試験時の舵角の遅れを考慮したシミュレーション計算と試験結果は、旋回軌跡、船速低下とも良く一致している。

Circle Test (portside -35 deg.)

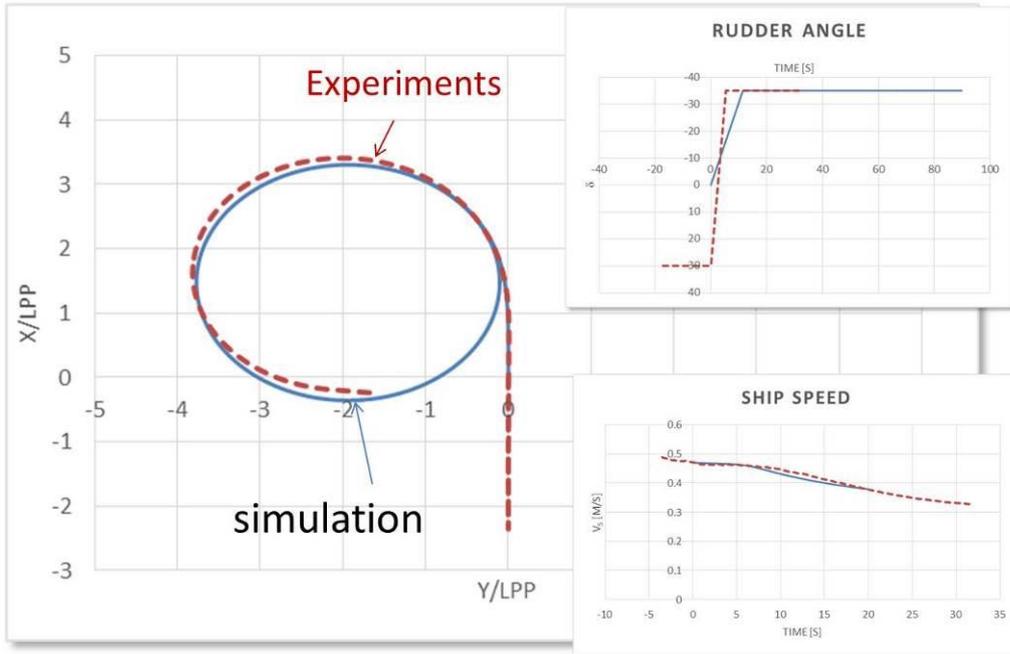


図 4-2-3-1 旋回性能の試験結果と計算結果の比較

図 4-2-3-2 は 20° Z 試験の様子を示す。水槽長さの制限から一次遅れまでの計測となっているが、計算結果と良い一致を見ている。

With Starboard Rudder only

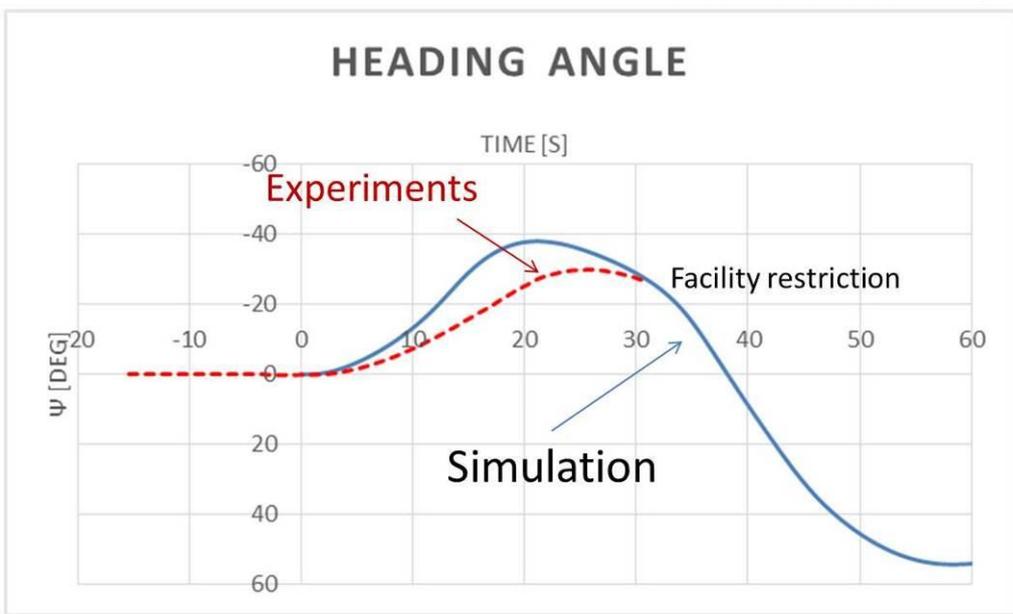


図 4-2-3-2 Z 試験の試験結果と計算結果の比較

図 4-2-3-3 は、フィッシュ・テール舵を装備した場合と、ゲートラダーを装備した場合の旋回試験時の軌跡を比較したものである。図中に示すとおり、ゲートラダーの舵角は左舷側が -30° で右舷側が $+60^{\circ}$ である。ゲートラダーの方が旋回径が大きいが、これはゲートラダーの方が旋回開始後の船速低下が少ないためである。図 4-2-3-4 に旋回時の船速低下の様子を示す。

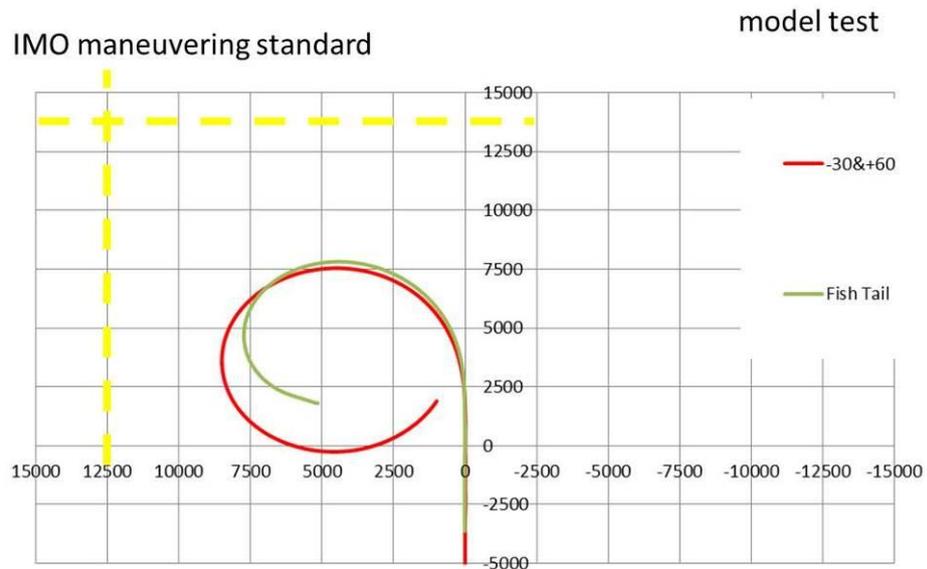


図 4-2-3-3 フィッシュ・テール舵とゲートラダーの旋回試験結果比較

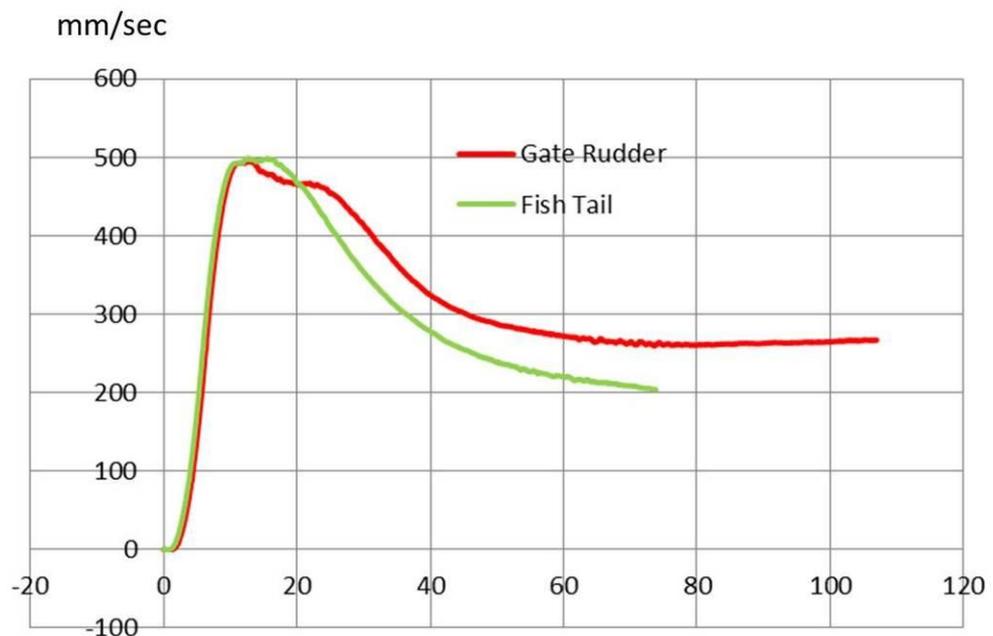


図 4-2-3-4 旋回試験中の船速変化

4.2.4 水槽試験による波浪中抵抗増加低減の検証

波浪中における推進性能は、これまでシーマージンと言った形で船の性能評価パラメー

タの一つとして捉えられてきたが、近年、平水中の性能と同程度の精度で、このシーマージンを評価しようと試みる研究が数多く実施されるようになった。また 2013 年の 1 月に発効した EEDI (Energy Efficiency Design Index) の中でも、オプションではあるが、EEDIweather として、この波浪中性能を評価するしくみが採用されている。

ゲートラダーの先行技術開発の中でも、ニューキャッスル大学において、全長 2.5m のコンテナ船模型を使用した世界で初めてゲート舵付き船型の波浪中性能試験が実施された。試験装置の関係から、波浪中の抵抗試験のみ実施し、造波機を用いて正面向かい波の状態、波高と速力条件を変えながら波浪中の抵抗増加を計測した。

計測された抵抗増加の例として、18.2 ノット、規則波高 4 m での計測結果 (EHP : 有効馬力) を、ゲートラダーと通常舵の 2 船型で比較したものを図 4-2-4-1 に示す。波高の小さいところでは、それほど顕著な差は見られなかったが、最大波高として実施した 4 m の条件では、どの周波数帯においても明確な違いが見られた。

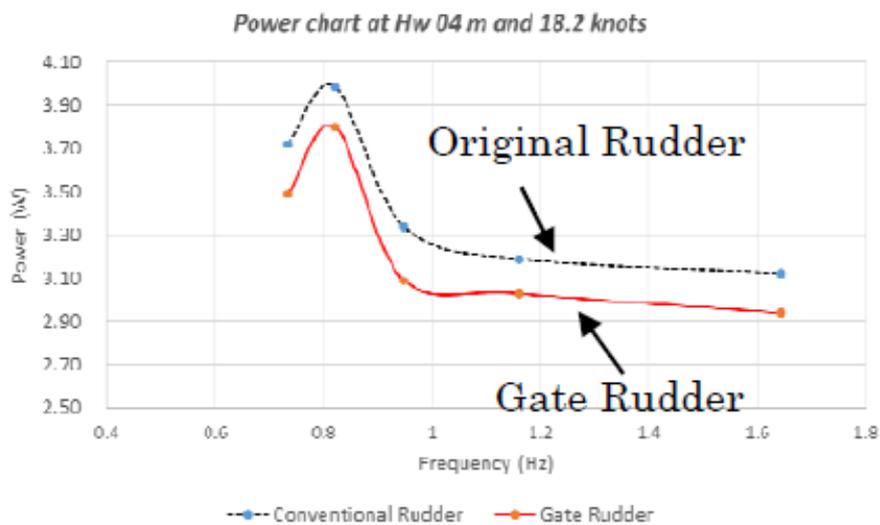


図 4-2-4-1 規則波中抵抗試験結果 (EHP)

模型で得られた図 4-2-4-1 の抵抗の違いを馬力計算に反映させ、舵の異なる 2 船型の馬力 (BHP : 制動馬力) の比較を図 4-2-4-2 に示す。2.5m コンテナ船模型を用いた波浪中の抵抗試験結果から、大波高の 4 m (実船換算) においては抵抗増加に有意な差が生じた。

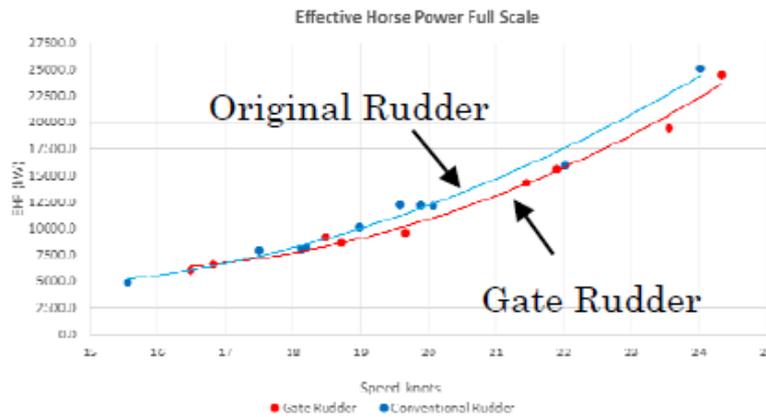


図 4-2-4-2 規則波中馬力推定結果(BHP)

4.2.5 数値計算によるキャビテーションとプロペラ起振力の検討

プロペラ起振力による船尾振動は、疲労による構造部材の劣化を誘発し船の安全を脅かすだけでなく、船内騒音を増加させ労働環境の悪化にもつながる。さらに、総トン数 1600 トン以上の新造船には、改正された船内騒音コード⁵⁾に関する SOLAS 条約が 2014 年 7 月から適用されるため、より厳しい騒音基準値を満たす必要が生じている。このような状況の中、新造船は燃費指標である EEDI を満たす推進システムは、同時に振動や騒音も低減できることが理想的と言える。

ゲートラダーは、プロペラ面の流場を大きく改善する可能性があることから、プロペラ起振力増幅の原因であるキャビテーションを抑制し、プロペラに起因する振動や騒音を低減する可能性が大きいと、その検討を行った。

4.2.5.1 流場改善効果

ゲートラダーは、通常舵のようにプロペラ面の船体中心線上に現れるキャビテーションを助長する伴流を形成しないばかりか、そのダクト効果によりプロペラ面全体の均一化に寄与すると予想される。

ゲートラダーの場合、舵に流入する流場は2つの成分があり、一つはプロペラの影響を考慮しない船体伴流、もう一つはプロペラが回転することにより生じる船体伴流の変形と、プロペラが推力を発生することにより生じる船体伴流の加速である。ゲートラダーのプロペラ面への影響を検討するため、ここではその影響が大きいと考えられる舵厚さによる速度ポテンシャルを利用した計算法を利用して、キャビテーション発生量に重要なパラメータである舵によるプロペラ翼への迎角変化を近似的に求めた。ゲートラダーと通常舵のそれぞれに対する迎角変化の違いを図 4-2-5-1-1 に示す。

⁵⁾ 船内騒音コードの概要並びに NK の取り組み、2015. 7、Class NK 資料

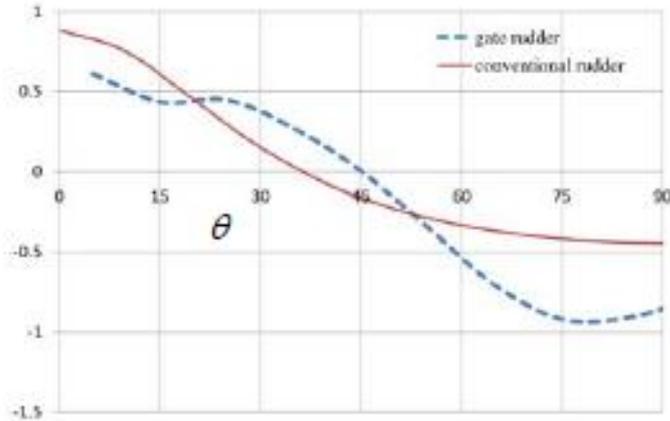


図 4-2-5-1-1 舵の違いによるプロペラ翼への迎角変化の違い

図 4-2-5-1-1 から、通常舵では、プロペラ回転中でキャビテーションの発生が大きくなる角度位置 0 度から 30 度の間で、0.9 度から 0.2 度へと大きく変化する迎角が、ゲートラダーでは約 0.5 度の一定値を取り、キャビテーションの安定に寄与し、その変動によって発生する変動圧力を軽減するであろうという事が示された。

4.2.5.2 キャビテーション発生量低減効果

上記、迎角変化の違いがプロペラ翼面上のキャビテーション発生量に与える影響を数値計算でシミュレーションを行った。図 4-2-5-2-1 の左側に通常舵の場合の、また右側にゲートラダーの場合のキャビテーション発生領域を青色で示す。ゲートラダーのキャビテーション発生領域の方が通常舵の領域よりも小さく、図 4-2-5-1-1 の迎角変化の違いにより示されたキャビテーション発生量の違いが明らかである。

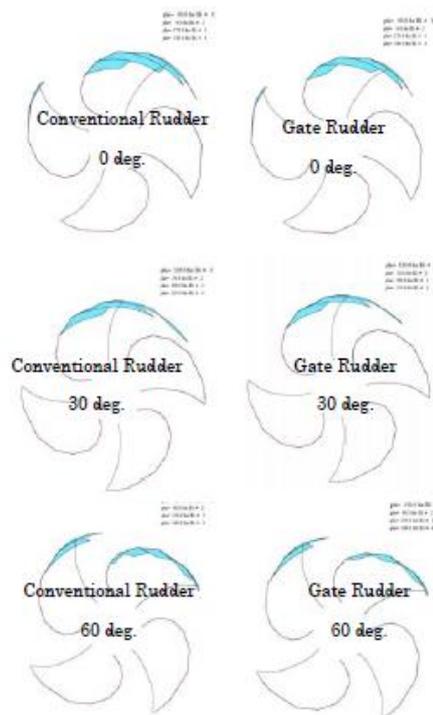


図 4-2-5-2-1 舵の違いによるプロペラ・キャビテーション発生量の違い

このキャビテーション発生量の低減は、船体へのプロペラ起振力（サーフェスフォースと呼ばれる船体への水圧変動圧力）の低減につながる事が予想される。

4.2.5.3 プロペラ起振力低減効果

ここではRoRo船（Roll-on/Roll-off船）を対象として実施されたキャビテーション試験結果と、その結果に基づいて実施されたサーフェスフォースの検討結果を示す。

模型試験は海上技術安全研究所が所有する大型キャビテーション水槽において実施した。試験にはRoRo船用のプロペラ模型を用いて、模擬された伴流中でキャビテーションにより増幅されるプロペラ変動水圧を計測した。図4-2-5-3-1はその時のキャビテーションパターン、図4-2-5-3-2は通常舵の場合の船尾変動水圧の計測結果と、ゲートラダーの場合の船尾変動圧力の推定値を示す。

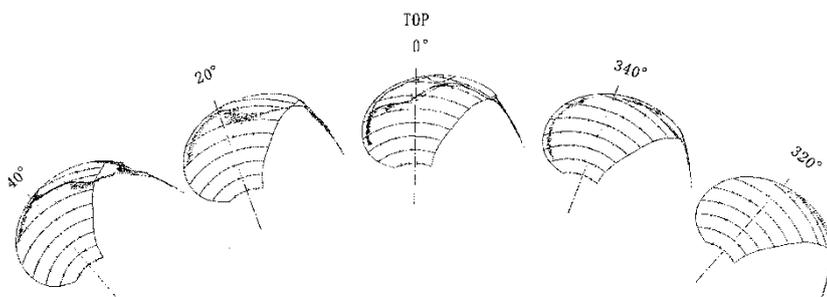


図 4-2-5-3-1 キャビテーションパターン

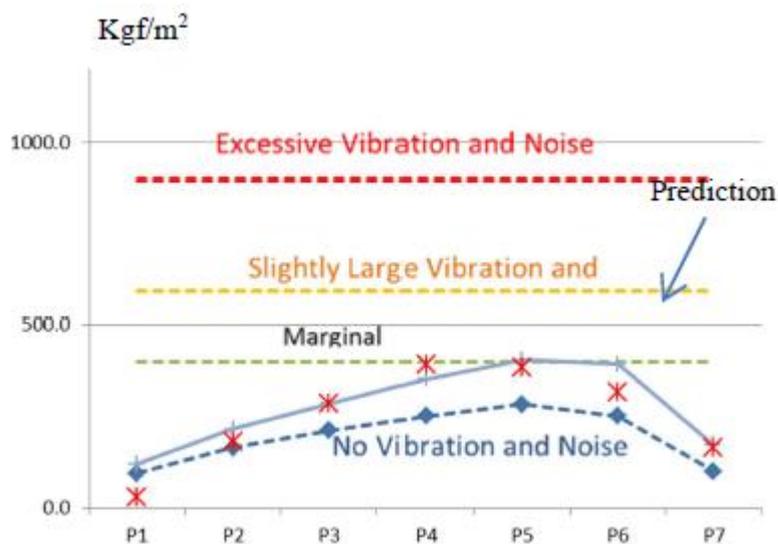


図 4-2-5-3-2 ゲートラダーを装備した場合の起振力予測結果

図 4-2-5-3-2 には、3種類の変動水圧が示されているが、X印が実験値、実線がそれ

に対応した推定値、破線がゲートラダーを採用した場合に予想される船尾変動水圧である。推定計算はいずれも佐々木らの方法⁶⁾を用いている。なお、変動圧の計測はプロペラの直上、左舷側プロペラ直径の35%、右舷側プロペラ直径の50%の範囲を計測した。実験値と推定計算との一致は、ほぼ良好と言える。本船にゲートラダーを採用した場合、約30%の軽減効果が期待できる結果となった。

5. 平成29年度の実施内容

5.1 試験対象船

ゲートラダーの実船性能を把握するための試験対象船として、2510 総トン型コンテナ船「しげのぶ」が選定された。造船所でもあり船主でもある山中造船と、備船される井本商運のご厚意により実船試験が実現する運びとなった。

試験対象船となるコンテナ船は、同型船が同じ山中造船で1年ほど前に建造されており、実船での比較する上で非常に貴重な機会となった。

表5-1-1に試験対象船「しげのぶ」と同型船「さくら」の船体およびお装備機器の緒元比較を示す。

表 5-1-1 試験対象船と同型船の主要目比較

船名		「さくら」	「しげのぶ」
船番		1051	1070
建造年		2016年	2017年
船体	Lpp(m)	101.9	100.6
	B(m)	17.8	
	D(m)	8.8/5.29	
	d _M (m)	5.25	
主機	連続定格最大出力(kW)	3309	
	回転数(min ⁻¹)	220	
舵	タイプ	フラップ舵	ゲートラダー
	タイプ	CPP	
プロペラ	翼数	4	
	直径(mm)	3500	3300
	ハブ比	0.274	0.273
	EAR	0.53	0.512
	設計ピッチ比(0.7R)	0.69	0.835

ゲートラダーがプロペラ位置に装備されるため、「しげのぶ」は垂線間長(Lpp)が同型船よりも短くなっている。主要目、主機定格出力は同一だが、ゲートラダーのダクト効果によりプロペラ流入速度が大きくなるため、「しげのぶ」のプロペラ直径は小さくなり、設計

⁶⁾ 佐々木紀幸、永松秀一、「サーフェスフォースの実船計測例とその簡易推定式」、住友重機械技報 32 巻 94 号、2011.7

ピッチ比も高くなっている。またプロペラ直径が小さくなることにより、可変ピッチプロペラ (Controllable Pitch Propeller: CPP) のハブ直径も小さくなっている。

5.2 ゲートラダーの設計/製作

5.2.1 ゲートラダーの設計

ゲートラダーは舵板がプロペラの両側に配置され、船尾方向から舵を見たとき、船軸が垂直に立った舵板からオフセットさせた状態で配置されている。ゲートラダーは舵板、舵軸、ラダートランクで構成されており既存の舵とほとんど変わらない。舵板で発生させた舵力を軸受により船体に伝える構造も既存の舵と同様である。しかし、舵板は舵軸に対してオフセットされた位置に配置され、特殊な形状をしている。図 5-2-1-1 にゲートラダー船尾方向からの形状を示す。

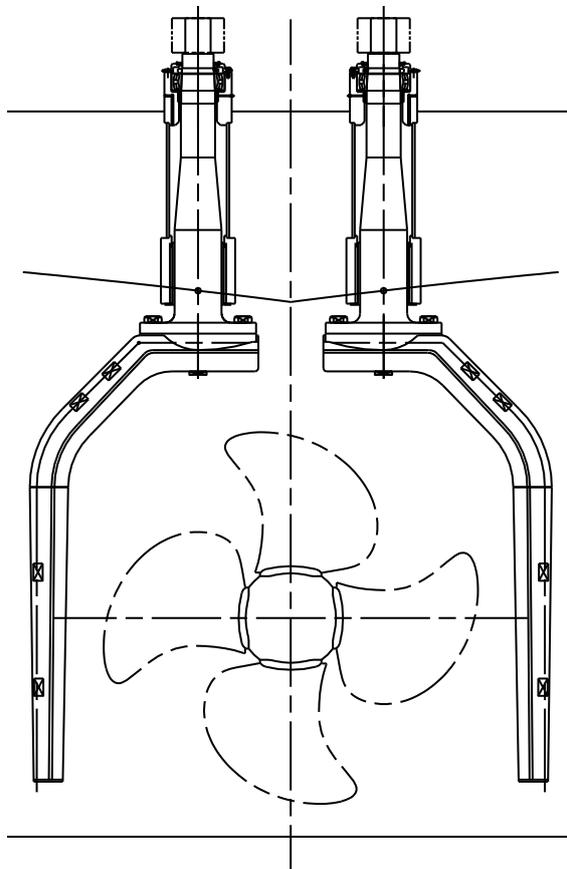


図 5-2-1-1 ゲートラダー船尾方向からの形状

その為、オフセットさせた部分の設計では通常の舵と異なり鋳物を使って形状と強度を成り立たせることにした。強度の確認の為に有限要素法 (Finite Element Method: FEM) を使った。図 5-2-1-2 に FEM による計算結果を示す。

FEM の結果より舵軸のフィレット R の部分に高い応力があることが分かった。しかし、舵軸材料の降伏点より十分小さく問題なかったのでこのまま設計を進める事にした。

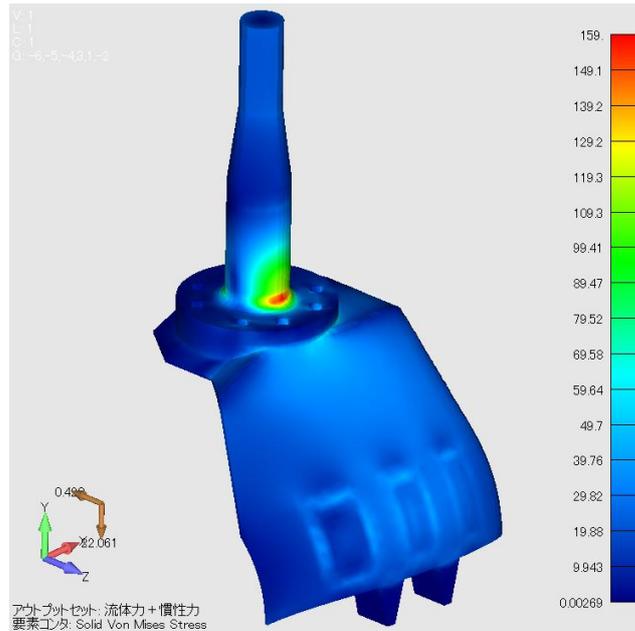


図 5-2-1-2 FEM 計算結果

次に舵角範囲について、今回のゲートラダーでは特殊モードとしてクラビングモードを開発した。航海中の速力では通常の舵と同様に操船ができ、港湾内など低速となれば船尾側への舵角を大きく取り通常の舵と遜色ない操船が出来ると想定出来ていたが、離着岸ではプロペラ後流を完全に受けられないため、既存の舵のように船尾を岸から離す動きの力（キック力）が不足するのではないかと懸念があった。その為、ゲートラダーではクラビングモード（スラストモード）という特殊なモードを考え短所となる部分を補うように考えた。クラビングモードは舵角範囲が船尾方向に $50^{\circ} \sim 110^{\circ}$ の範囲となる。大舵角用の操舵機で船首側 -15° 、船尾側 110° の舵角に対応する事が出来る。

図 5-2-1-3 に舵角の表記を、図 5-2-1-4 にクラビングモードの舵角の例を示す。各図は舵を頭上方向から見下ろしている状態で示している。

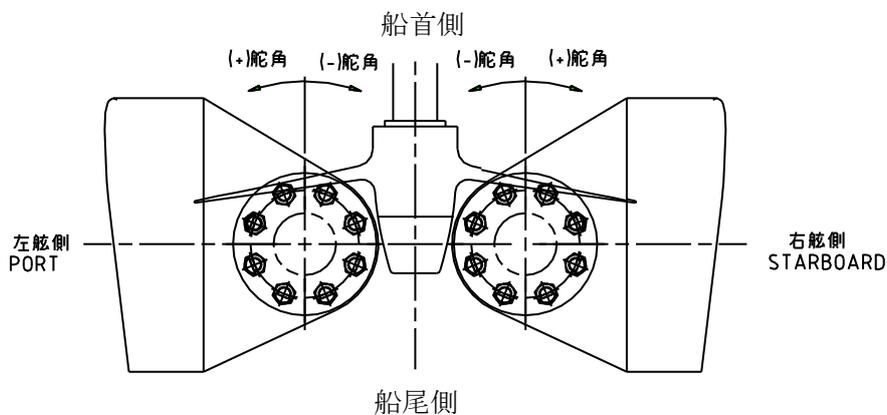


図 5-2-1-3 舵角の表記

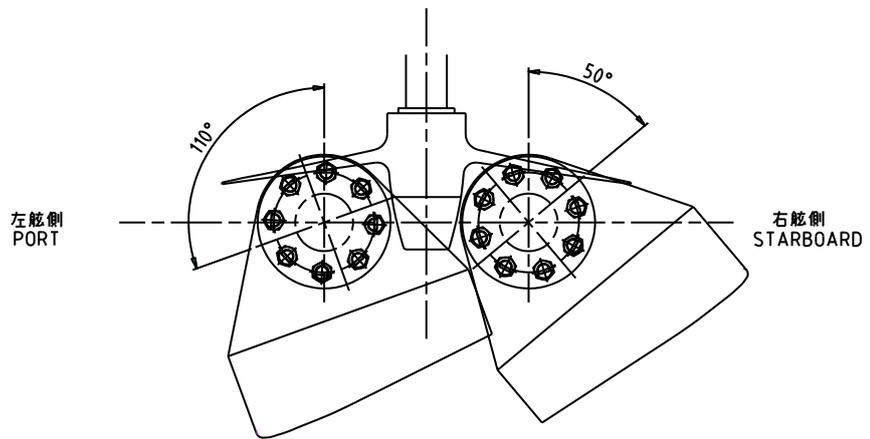


図 5-2-1-4 クラビングモードの舵角の例

クラビングモードは左右の舵板が単純に後方から見ると重なっているように見える。しかし、実際にはお互いに干渉する事なくクラビングモードとして成り立っている。

ゲートラダーの舵板は舵軸にオフセットされた特殊な形状をしている為、2Dの検討では舵角を取った時の舵板間のスキマ量を検討出来なかった。そこで、3Dモデルを使用して舵板間のスキマ量を確認した。図 5-2-1-5、図 5-2-1-6 にスキマ量検討の様子を示す。図中では青色の舵板と灰色の舵板の間に青色の細い線が見える。図 5-2-1-5 では灰色の舵板の上部左側に青い線が見える。この線がモデル上で計算された舵板間の最少スキマ位置である。図 5-2-1-5 の図中ウインドウ上に最少スキマ量が数値として表示される。図 5-2-1-5 の図中の白抜き矢印の方向からスキマを確認すると図 5-2-1-6 ように見える。

このように、計画上の最少スキマ量が確認出来たところで、製造の公差やFEMで計算された舵板の変形量なども考慮して必要最小スキマ量を決定した。

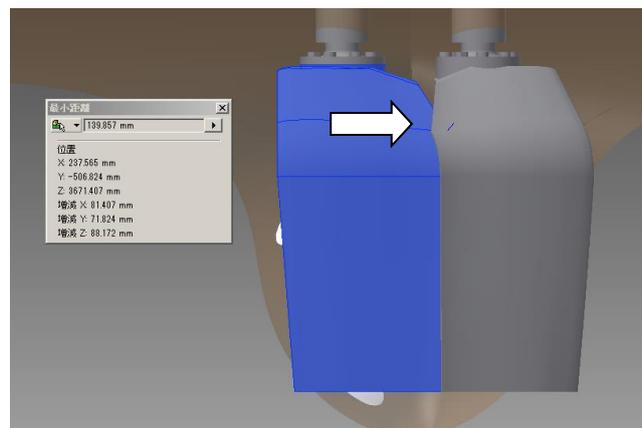


図 5-2-1-5 スキマ量検討の様子（船尾から見て）

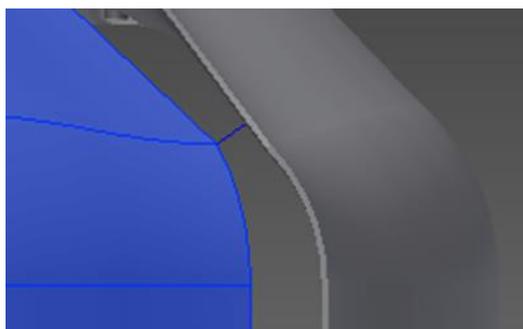


図 5-2-1-6 スキマ量検討の様子（拡大）

スキマ量については、3Dモデルを使用してクラビングモードに関するすべての舵角について確認し、計算された最少スキマ量を表にまとめた。図 5-2-1-7 にスキマ表を示す。図中の灰色の部分には舵板同士が干渉するため使用できない範囲となり、赤い部分が必要最小スキマ量を満たしていない範囲となる。この範囲ではクラビングモードが使用せず、緑や黄色の範囲で使用される。表にまとめた事でこのような範囲が分かりやすくなった。

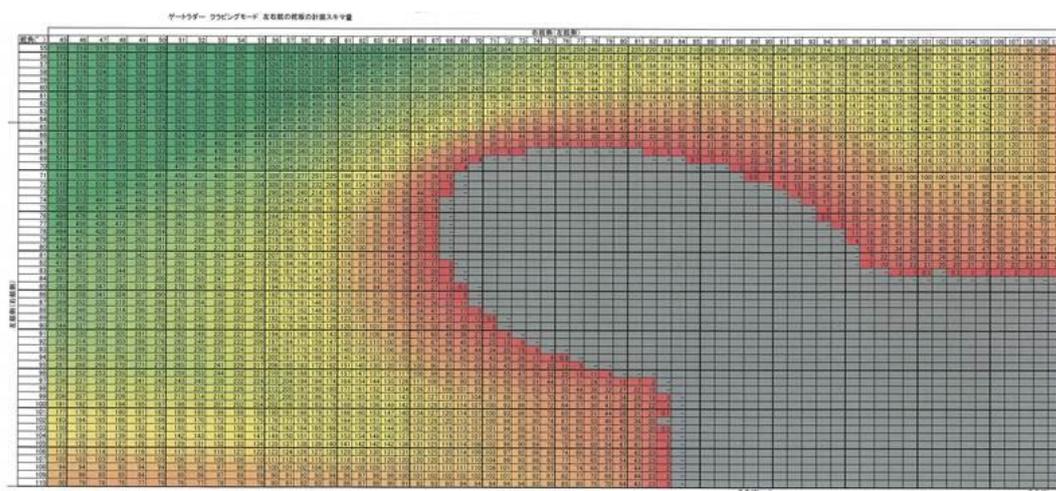


図 5-2-1-7 スキマ表

舵を設計する上で、舵トルクは欠かせない。舵トルクは理論値と実験値で確認したうえで操舵機の選定を進めた。また、実船試験（海上試運転）において舵トルクを操舵機トルクとして計測し確かめる事とした。

5.2.2 ゲートラダーの製作

特殊な形状を実現するため鋳物を核として設計した。製造も鋳物部分を中心に製造した。写真 5-2-2-1 に鋳物素材の写真を示す。



写真 5-2-2-1 鋳物素材

また、ゲートラダーは舵板全体にわたって翼断面形状を採用しているので、形状を確認するのが難しかった。そこで、3D レーザ計測を取り入れて形状の確認を行った。写真 5-2-2-2 に 3D レーザ計測の様子を示す。計測の結果、目標とする公差内に収める事が出来た事が確認された。



写真 5-2-2-2 3D レーザ計測の様子

5.3 ゲートラダー用船尾の設計/製作

通常舵を装備する 1 軸船とは異なり、ゲートラダーはプロペラの両側に 2 枚の舵が配置されるため、ラダーポストがセンターライン上に位置せず、操舵機も 2 式となるため、同型船の船尾構造をベースとしてこれらの変更点を考慮して設計図を作成し、船尾構造を製

作した。

5.3.1 船尾骨材の設計/製作

通常舵が装備される船舶では、プロペラ後部センターライン上にラダートランクが配置するが、ゲートラダー装備船ではラダートランクをプロペラの両側に設ける構造として船尾骨材計算書及び船尾骨材図を作成した。ゲートラダー用ラダートランクは船尾骨材に組み込む構造で設計した。船尾骨材は、設計図に基づき製作した。船尾骨材図の一部を図5-3-1-1に、船尾骨材を写真5-3-1-1に示す。

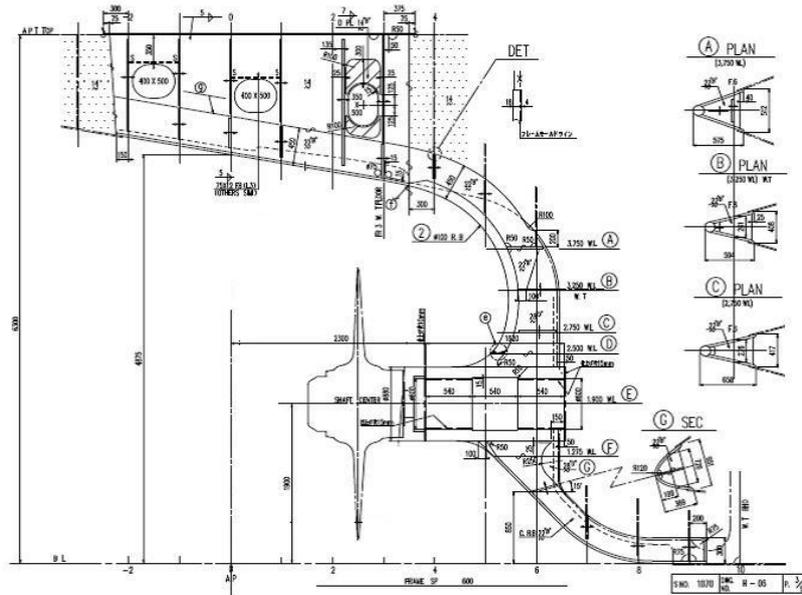


図 5-3-1-1 船尾骨材図(一部)



写真 5-3-1-1 船尾骨材

5.3.2 船尾ブロックの設計/製作

船尾ブロックの設計では、ゲートラダーの舵軸及びラダートランクの配置場所の外板、デッキを増厚し、これらに接続する内部材等を増厚し、補強材も増設した。ゲートラダー設置スペースの操舵機や関連の機器を設置する場所は、船体振動等に留意した設計とし、船尾骨材を組み込んだ船尾ブロックを製作した。船尾構造図の一部を図 5-3-2-1 に示す。

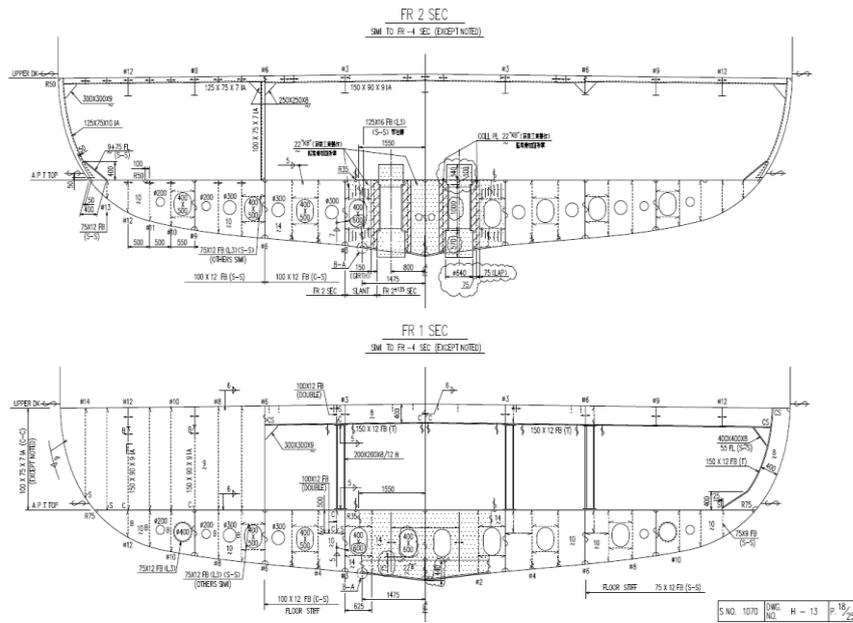


図 5-3-2-1 船尾構造図（一部）

5.3.3 操舵機台等の設計/製作

操舵機、油圧ポンプユニット等の取り付け台各 2 式は、操舵トルクや振動に留意して設計、製作した。操舵機台を写真 5-3-3-1 に示す。

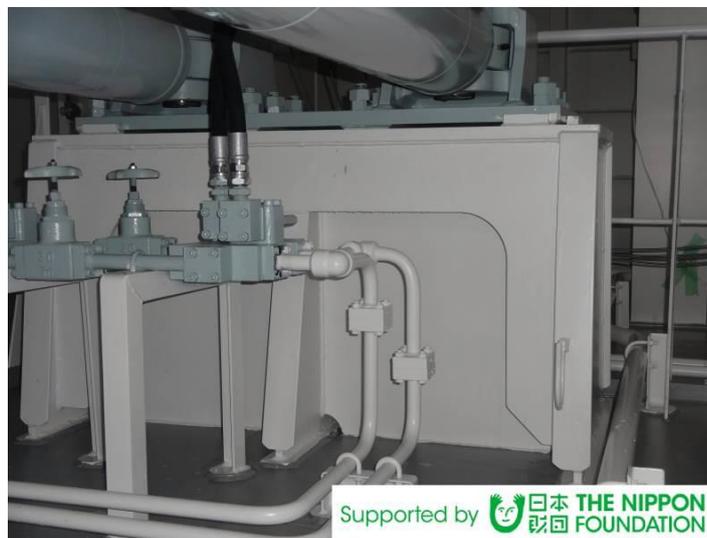


図 5-3-3-1 操舵機台

5.3.4 操舵機室配置図

ゲートラダー操舵機や関連機器の全て2式を、周囲のメンテナンススペース、機関部及び甲板部の予備品等の置き場を確保するために、出来るだけコンパクトな配置になるよう設計し、操舵機等を船尾ブロックに取り付けた。

5.3.5 操舵機室内油圧配管等の設計

ゲートラダー用の2式の操舵機及び油圧ポンプユニット用の油圧配管は、係船機油圧配管やその他の配管との干渉に留意して、配管装置図および配管一品図を作成し、諸管装置図により船尾ブロックに配管を施工した。操舵機室諸管装置図を図5-3-5-1に示す。

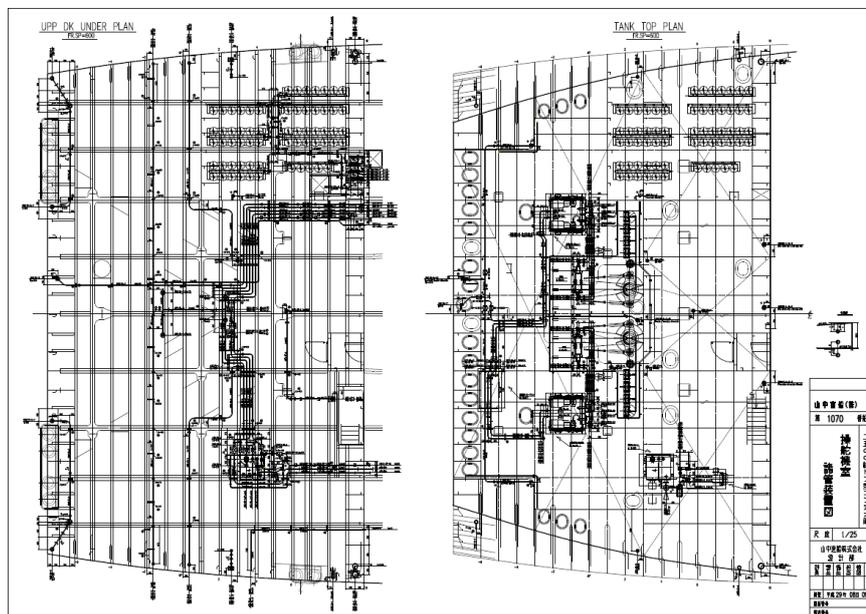


図 5-3-5-1 操舵機室諸管装置図

本事業でゲートラダーを搭載した同型船は、2510GTのコンテナ船であったので、船尾部のデッキ広さ及びラダーランクの配置に必要な高さは、ゲートラダーの搭載に関して十分であり特に問題はなかった。しかし既存船に適用という視点からは、内航499GT型、749GT型貨物船等では総トン数に制約があり、貨物スペースや載貨重量を確保するために船尾部のデッキや外板を極端に絞った船型もあり、このような船では、ゲートラダーを配置出来ない場合が考えられる。

5.4 ゲートラダー制御装置の設計/試作

5.4.1 新規型式追加

ゲートラダー用制御装置（オートパイロット）は、2枚舵装備船用のオートパイロットが内蔵されている東京計器のPR-9000シリーズに、ゲートラダー用の機能を追加することにより開発した。新規型式はPR-9000A-**-GT2と呼称し、最後のGはGa

t e R u d d e r 制御用の専用型式を意味し、これまで販売されていた製品と異なることを示す。

表の 5-4-1-1 にゲートラダー用オートパイロットに実装された主なユニットを、図 5-4-1-1 には操縦スタンドの操作面を示す。

表 5-4-1-1 主な実装ユニット

No.	ユニット名称	役割
①	レピーター (RU)	操舵で使用しているヘディング情報等を表示します
②	ヘディングコントロール (HCU)	自動操舵時 (【HC】モード) に使用します。
③	システム切替 (SYSTEM)	本システムの起動、停止、HCU の選択を行います。
④	ヘルム (HELM)	操舵用の舵輪です。【HAND】モード時に使用します。
⑤	モード切替 (MODE)	操舵モードの切替を行います。
⑥	ノンフォロアップ (NFU)	操舵モードが【NFU】モード操舵時に使用します。
⑦	アナシエーター (ANN)	舵機および本システムの状態やアラートを表示します。RCSU と遠隔手動操舵場所の選択も行います。
⑨	リモートコントロール切替 (RCSU)	遠隔手動操舵場所の選択を ANN と行います。
⑩	クラッシュアスターパネル	クラッシュアスターンを行うときに使用する。



図 5-4-1-1 操舵スタンド

5.4.2 追加機能

通常仕様のオートパイロット PR-9000 シリーズにゲートラダー対応として、以下の仕様追加1)～6)を実施した。

1) 操舵モードによる舵角制限を変更

ゲートラダーは左右舷の舵板の舵角が、平行操舵ではなく非対称な操舵を要求されるので、表 5-4-2-1 に示すような舵角制限を設けている。

表 5-4-2-1 で、

- Hand/HC は、通常航海時と港湾航行時に使用される手動（舵輪）操舵あるいは自動操舵モード
- REMOTO CONTROL は、微速前進時（離着機性能）を重視したクラビングモード時に使用される専用ケーブルリモコン操作モード
- Non Follow Up (NFU) はバックアップ用に通常装備されるレバー操作モードを意味する。

表 5-4-2-1 操舵モードによる舵角制限

操舵モード		
HAND/HC	REMOTE CONTROL クラビングモード	Non Follow Up (NFU) モード
①通常状態 S 舵 P70 S15 P 舵 P15 S70	3パターン固定 ①STANDBY S 舵 P57 P 舵 S57	S 舵 P110 S25 P 舵 P25 S110 (*3)
②船速による舵角制限 S 舵 P35(*1) S15 P 舵 P15 S35(*1)	②PORT SIDE S 舵 P110 P 舵 S57 ③STBD SIDE S 舵 P57 P 舵 S110 (*2)	

*1 ソフトウェア設定により最大舵角を制限する。

*2 ソフトウェア設定により①～③の舵角を設定する。

*3 6) に詳細は記載する。

2) 手動操舵モード (HAND)

手動操舵モードは、最大舵角が90°のため、新規に舵角命令メモリ板を作成した。



図 5-4-2-1 舵角命令メモリ板

手動操舵時の舵角範囲により、アナンシエータユニットに表示する舵角メモリの表示を、狭舵角の場合には図 5-4-2-2 の舵角メモリを、広舵角の場合には図 5-4-2-3 の舵角メモリを表示させる。

SYS-NO.1 HAND				
P.U. NO	P-2	P-1	S-2	S-1
POWER	ON	ON	ON	ON
STATE	STOP	RUN	STOP	RUN
P/S		▶		▶
30° P.RUD. 70° 70° S.RUD. 30°				

図 5-4-2-2 狭舵角表示

SYS-NO.1 HAND				
P.U. NO	P-2	P-1	S-2	S-1
POWER	ON	ON	ON	ON
STATE	RUN	RUN	RUN	RUN
P/S	▶	▶	▶	▶
30° P.RUD. 85° 85° S.RUD. 30°				

図 5-4-2-3 広舵角表示

レピータユニットの舵角表示範囲および、ゲートラダーの舵板の内側、外側への動きに合わせて舵角を表示するよう、通常舵のレピータ表示方向を変更した。変更したレピータ表示を図 5-4-2-4 に示す。



図 5-4-2-4 レピータ表示

※ 試運転を実施した結果、開発関係者の意見により、手動操舵モードの最大舵角は70°とし、図 5-4-2-1 の舵角命令メモリ板を70°で再作成した。

3) クラビングモード

離着岸操船時に舵の動作で、スタンスラスターと類似の操船ができる機能を追加した。クラビングモードへの移行は通常の遠隔手動操舵と同様で、手動操舵モードからモードをクラビングモードに切り替える。図 5-4-2-5 に専用ケーブルリモコンに装備されたクラビングモード用操舵ダイヤルを示す。クラビングモードの場合、接続した専用ケーブルリモコンで、表 5-4-2-2 に示す、予め設定された3パターンのいずれかの舵角を指示する。

クラビングモードに入ると、最初の舵の位置はスタンバイ状態①になる。PORT または STBD の位置はダイヤルを約90°回すことにより舵角が指示され、①から②または③へ移行する。

表 5-4-2-2 に前述のクラビングモード時の左右舷の舵位置のイメージを示す。STANDBY では、両舷の舵板は60°にセットされ、専用ケーブルリモコンのダイヤル操作により、赤色の舵板がクラビングモードで設定された舵角にセットされる。



図 5-4-2-5 クラビングモード用操舵ダイヤル

表 5-4-2-2 クラビングモード

クラビングモード	舵の位置
①STANDBY S 舵 : P60 P 舵 : S60	
②PORT SIDE S 舵 P110 P 舵 S60	
③STBD SIDE S 舵 P60 P 舵 S110	

4) クラッシュアスターン

NFU 操舵モード以外で、クラッシュアスターンボタン (CA) を押すと予め設定した舵角へ舵を移動し、クラッシュアスターン動作になる。図 5-4-5-6 にクラッシュアスターンパネルを、図 5-4-2-7 にクラッシュアスターン表示を示す。また、表 5-4-2-3 にはクラッシュアスターン時の舵位置のイメージを示す。



図 5-4-2-6 クラッシュアスターンパネル

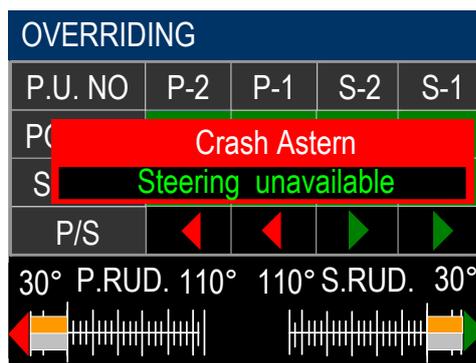


図 5-4-2-7 クラッシュアスターン表示

表 5-4-2-3 クラッシュアスターン

クラッシュアスターン	舵の位置
S 舵 : P25 P 舵 : S25	

クラッシュアスターンは、操舵モード切替を NFU モードに切替えるか、または、クラッシュアスターンボタンを再度押すことで解除できる。

クラッシュアスターンスイッチは常時点灯しているが、クラッシュアスターン中は通常の舵角操作が行えないことを操船者に認識させるため点滅する。

5) 船速による舵角制限

1) で記載した手動操舵モードあるいは自動操舵モード (表 5-4-2-1 の HAND/HC) の最大舵角制限は、スピードログ装置からの船速接点を監視することにより行う。船速が 10.5 ノット以上になると、舵角制限を作動し狭舵角に最大舵角制限を切替える。

6) 舵干渉の防止

本船は、舵板 (ツイン舵) の間隔が狭いため、2 枚の舵を内側に両方とも 60° を超えて舵角を取ると舵板が干渉する。そのため、60° を舵が超えた場合は、反対側の舵は 60° を超えないように、リミットスイッチを使用することにより、インターロック機能を実装した。

図 5-4-2-8 にインターロックの作動イメージを示す。この図では S 舵 (右舷側舵) の舵角が 60° を超えたので、S 舵側の舵角センサー (リミットスイッチ) がこれを感知し、P 舵側 (左舷側舵) の作動油用ポンプに制限をかけている状況を示している。この制限により P 舵は 60° より大きな舵角を取ることが制御上できなくなる。

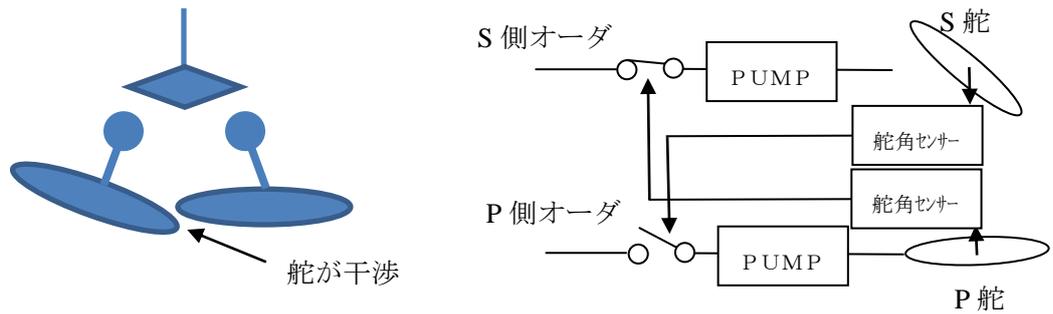


図 5-4-2-8 インターロック

5.4.3 開発・出荷検査方法

本船のオートパイロットの動作検証および出荷検査は、舵機シミュレータを使用し実施した。舵機シミュレータは、舵取機の動作をシミュレーションし、オートパイロットからの舵角命令に対して、フィードバックを返す制御を行う。

5.5 ゲートラダー操舵機の製作

ゲートラダーは前述の通り特殊モードしてクラビングモードを持つが、全舵角範囲が 140° であり、舵機との取合い部の構造が既存の舵と変わらないので既成の操舵機と組み合わせる事ができ、大舵角用の操舵機で対応する事ができる。但し、通常舵では舵角は左右で対称となるので左舷側に 70° 、右舷側に 70° となり、 0° は全舵角範囲の中央になるが、ゲートラダーでは、左右舷の舵が前縁側に -15° 、後縁側に 110° と特殊な舵角範囲を取るため、 0° におけるチラーの配置(角度)は通常舵の配置と比べてオフセットがついた状態となる。操舵機の容量は水槽試験やゲートラダー装備船の操縦シミュレーションの結果から、舵角と転舵トルクの変化を考慮して、十分な余裕を持って同型船と同型式の操舵機を選定することができた。左右舷にそれぞれ各1台装備された操舵機の写真 5-5-1~5-5-2 に示す。



写真 5-5-1 操舵機



写真 5-5-2 操舵機

5.6 ゲートラダー搭載

ゲートラダーの船体への搭載において、ゲートラダーがプロペラ両脇に配置されていることで通常の作業手順と違う手順となった。通常はプロペラ軸を入れてプロペラを組立てた後に舵を取り付ける。しかし、ゲートラダーでは、プロペラ軸を入れる前に舵を取付けることが可能なため先に取り付けることにした。取付け作業の様子の写真 5-6-1、写真 5-6-2 に示す。

作業自体は通常と同じだが、手順の違いにより今後のメンテナンスを考えるとゲートラダーは舵を外すことなく、プロペラ軸の軸抜き作業が出来ることが分かった。



写真 5-6-1 ゲートルダー搭載作業中の様子



写真 5-6-2 ゲートルダー搭載後の様子

進水後の供試船「しげのぶ」を写真 5-6-3 に示す。



写真 5-6-3 進水後の「しげのぶ」

5.7 実船試験（海上試運転）

5.7.1 速力試験結果

速力試運転は、2017年11月15日、16日に実施され。15日は翼角を変更したCPPモードを主に、16日は翼角を一定とするFPPモードのいわゆる通常の速力試運転を実施した。ここでは、翼角一定のFPPモードの速力試運転の評価結果を実施する。

図5-7-1-1に、速力試運転が実施された海域と試運転コースを示す。また、図にはブリッジにおいて計測された風速計の精度確認のために利用した、気象庁の気象記録が残る今治市の气象台の場所も示した。

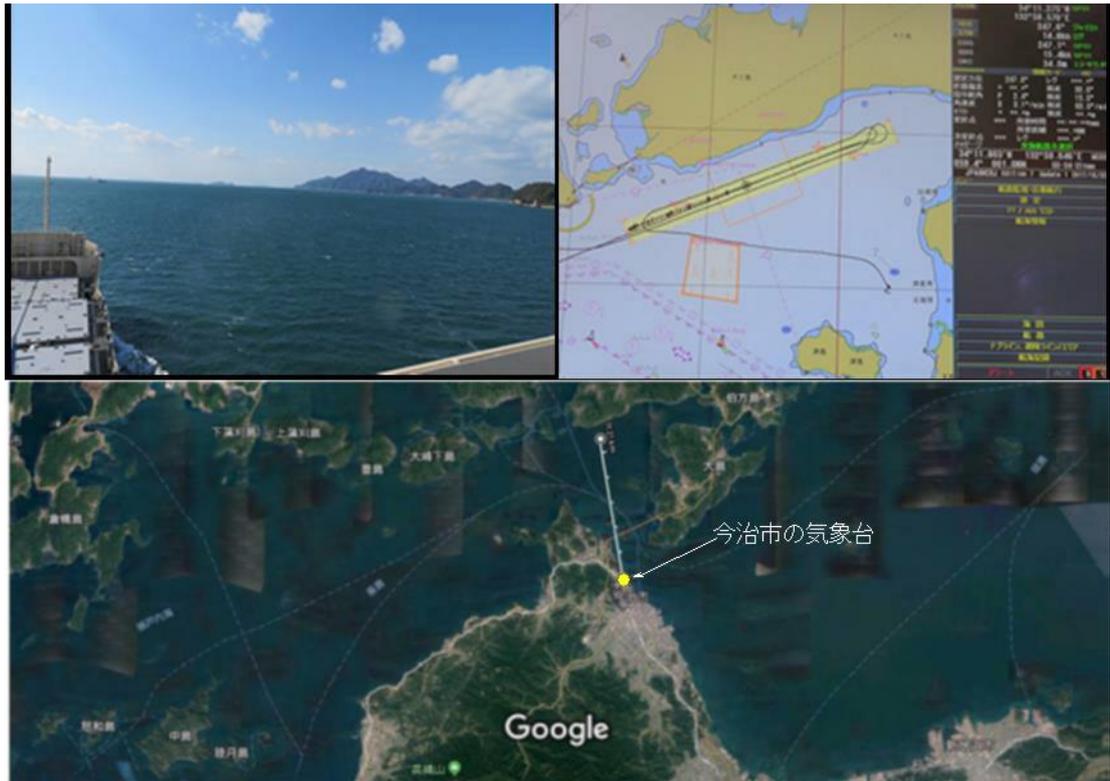


図 5-7-1-1 試運転海域・コースと気象台との位置関係

気象台は、図 5-7-1-1 に示すとおり試運転海域から 11 マイル南の位置にあり、ほぼ試運転海域に近い気象と考えられる。また気象台では風速・風向データは当日の 10 分ごとの平均値と最大瞬間風速が記録、公開されていて、試運転時の本船に搭載させた風速計のブリッジでの記録と突き合わせることが可能である。

同じように、ほぼ 1 年前に実施された同型船の速力試運転時の風データも気象庁のデータと比較し、図 5-7-1-2 に示した。実線は平均風速、破線は最大風速、*はブリッジでの記録である。

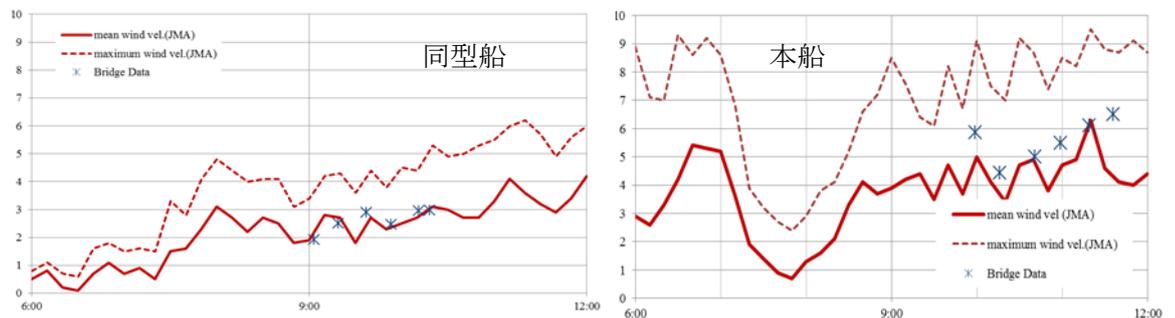


図 5-7-1-2 試運転時の風速データ（本船上データと気象庁記録の比較）

図 5-7-1-2 に示されるように、本船の試運転では前日から風速が 5 - 6 m/秒あり、海面もところどころ白波が見える状態であった。一方、約 1 年前に建造された同型船の試運転は、風速 3 m/秒以下で実施され、海面も平穏な状態であった。

内航船では、外乱を考慮した試運転解析を実施せず、往復の平均値だけで評価すること

が通常のプラクティスとして定着しているので、今回は、その両方のやりかたで評価する。

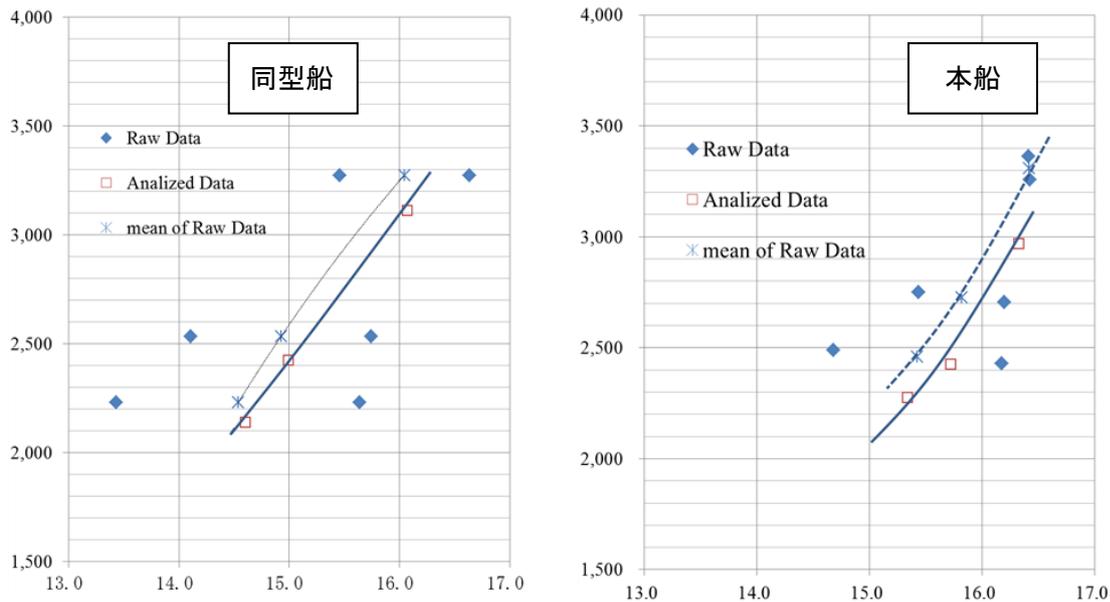


図 5-7-1-3 速力試運転結果（同型船および本船）

図 5-7-1-3 に、同型船および本船の速力試運転結果を示す。図には、計測された生データ（◆）、往復の平均値（*）および解析結果（□）が示されている。なお、解析に用いた風と波による抵抗増加は海上技術安全研究所で開発された船舶推進性能推定プログラム・HOPE Light で使用されている簡易法を用いている。

この結果から、ゲートラダーによる省エネ効果を表 5-7-1-1 および図 5-7-1-4 に示した。

表 5-7-1-1 速力試験結果で得られたゲートラダーの省エネ効果

Vs (kt)	同型船		本船	
	Raw (kW)	Corrected (kW)	Raw (kW)	Corrected (kW)
15.0	2,570	2,390	2,200	2,070
15.5	2,940	2,710	2,500	2,320
16.0	3,250	3,080	2,900	2,710

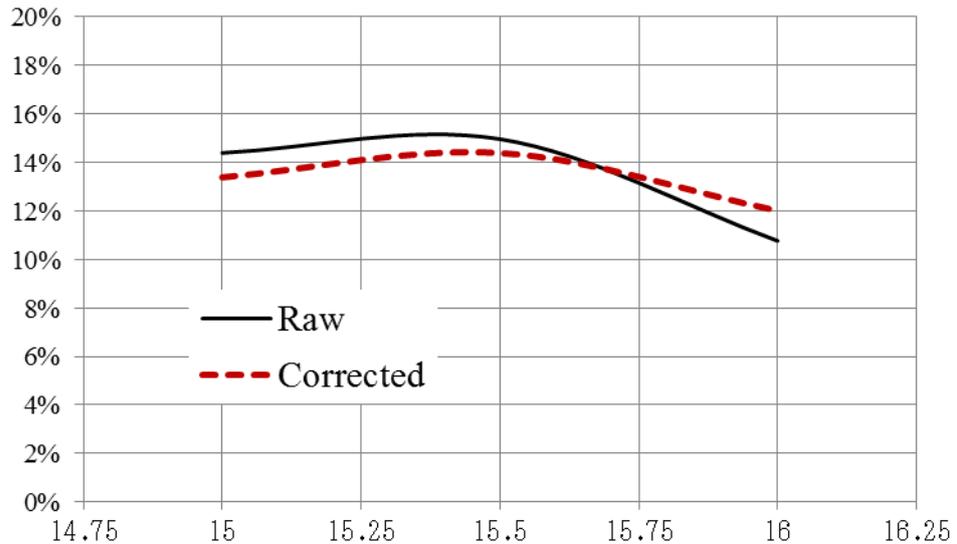


図 5-7-1-4 速力試験結果で得られたゲートラダーの省エネ効果
(潮流・風・波修正の有無)

5.7.2 操縦性能試験結果

5.7.2.1 操縦特性の概要

東京計器は船のオートパイロット^{※7}メーカーとして、一般的な舵と異なる対象船の操縦性を確認する必要がある。操縦性は【旋回性能】【停止性能】【保針・変針性能】の3つに区分される。オートパイロットに求められることは【保針・変針性能】であり、舵と船首方向(Yaw)の回転モーメントに関する性能である。図 5-7-2-1-2 に船の重心周りに働く力とモーメントを示す。

船の操縦性に関しては様々な確認方法があるが、今回は Z 試験(Zig-Zag 試験)とスパイラル試験を行い確認した。また、操縦性が確認された後に試運転にて、オートパイロットとしての実際の性能を評価した。

図 5-7-2-1-1 にゲートラダー用オートパイロットの基本機となる PR-9000 シリーズの写真を示す。

⁷ 【JIS F9604 : 2003(ISO 11674 : 2000) 船舶及び海洋技術-船首方位制御装置】に船舶のオートパイロットに関する規格がされている。



図 5-7-2-1-1 東京計器オートパイロット PR-9000 シリーズ

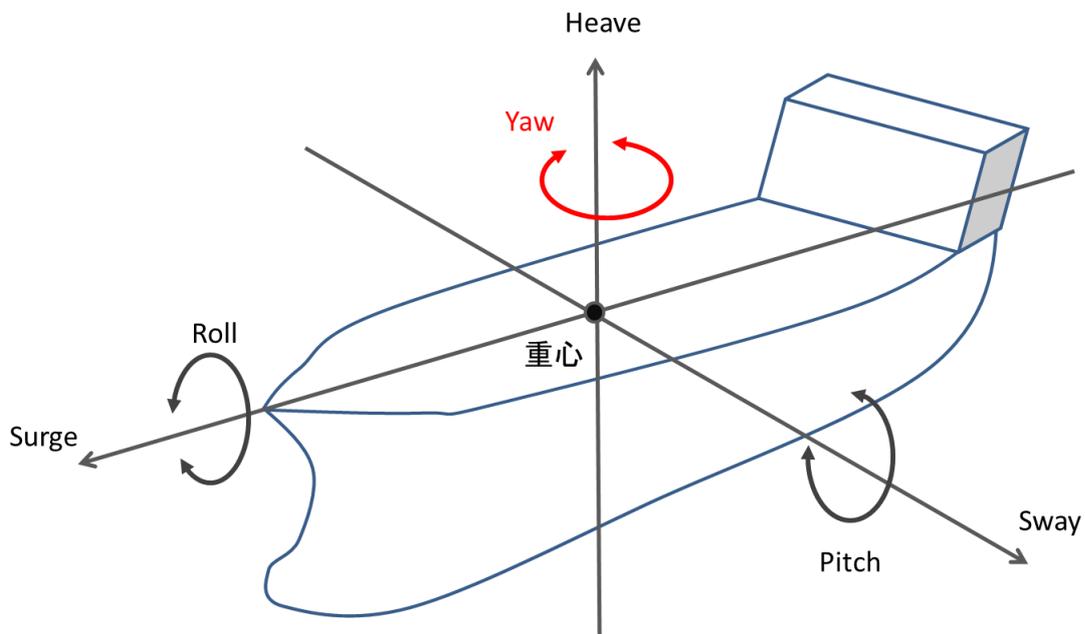


図 5-7-2-1-2 船の重心を中心に働く力

5.7.2.2 Z 試験概要

Z 試験とは船の操縦性を【保針・変針性能】に関する試験である。後記にあるスパイラル試験よりも簡易なので多くの船で使われる手法である。

Z 試験は 10° 試験と 20° 試験があるが今回は 10° 試験を行った。 10° 試験の方法は、基準となる方位に船を静定させ舵を 0° に固定する。その後、舵を左舷 10° に固定し方位が基準から左舷方向に 10° 偏移したら舵を右舷 10° に固定する。方位が基準から右舷方向に 10° 偏移したら左舷 10° に戻す。この一連の動作を数回行う。図 5-7-2-2-1 は Z 試験 (10°) の概要となる。赤線のように舵を操作すると緑線のように方位が変化する。この時、図 5-7-2-2-1 にある【First Overshoot Angle】、【Second Overshoot Angle】が操縦性の判断材料となる。

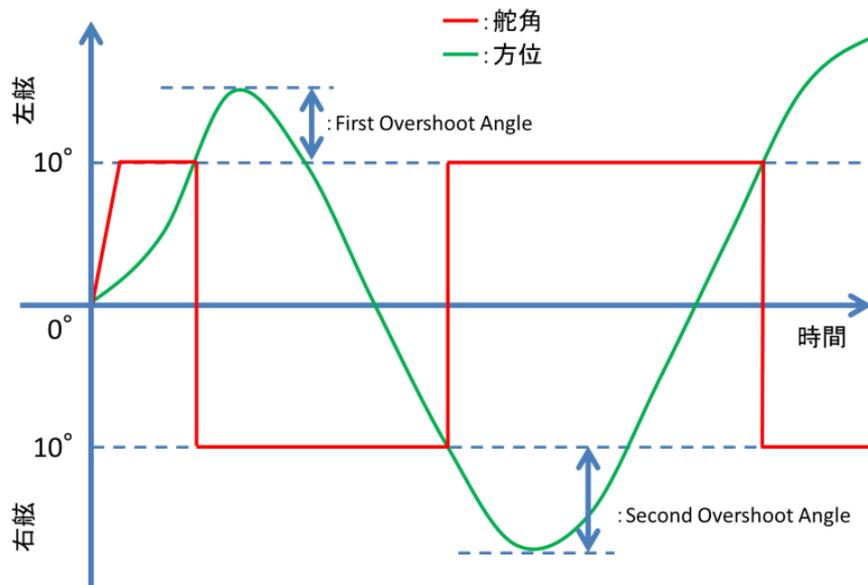


図 5-7-2-2-1 Z 試験概要

Z 試験の可否に関して言えば 2018 年現在、Z 試験に関して定められた最新の資料として、国際海事機関 IMO(International Maritime Organization)の海上安全委員会 MSC(The Maritime Safety Committee)が発効した 137(76)【STANDARDS FOR SHIP MANOEUVRABILITY】がある。この資料には図 5-7-2-2-2 のように各 Overshoot 量に対し基準値が定められている。これに従って本船の Z 試験を実施することとした。

.1	The value of the first overshoot angle in the 10°/10° zig-zag test should not exceed:
.1	10° if L/V is less than 10 s;
.2	20° if L/V is 30 s or more; and
.3	(5 + 1/2(L/V)) degrees if L/V is 10 s or more, but less than 30 s,
	where L and V are expressed in m and m/s, respectively.
.2	The value of the second overshoot angle in the 10°/10° zig-zag test should not exceed:
.1	25°, if L/V is less than 10 s;
.2	40°, if L/V is 30 s or more; and

図 5-7-2-2-2 MSC137(76) 抜粋 Z 試験基準値の計算方法

5.7.2.3 Z 試験結果

平成 29 年 11 月 14 日大三島沖にて Z 試験が行われた。試験海域を図 5-7-2-3-2 に示す。対象となる本船仕様は表 5-7-2-3-1 となる。

表 5-7-2-3-1

山中造船 No.1070 しげのぶ	
船長(Lpp)	100.6 m
航海速力	14.9 kn
載貨重量	3850 ton

IMO が要求する Z 試験のスペックは図 5-7-2-2-2 で定義されているので、船長と船速を元に First Overshoot Angle の許容値を計算する。初めに図 5-7-2-2-2 で示されている L/V について計算する。一般に L は船長、V は速力と定義されている。今回の Z 試験に関して V は航海速力をで行ったので、

$$L/V = 100.6 \text{ m} / (14.9 * 1852/3600) \text{ m/sec} \doteq 13.1 \text{ sec}$$

となる。L/V が約 13.1 sec なので、図 5-7-2-2-2 の

[L/V が 10 秒以上 30 秒未満の場合]

が適応され、図 5-7-2-2-2 の.3 項目から First Overshoot Angle の許容値として、

$$[5 + 0.5 * (L/V)] \doteq 11.6 \text{ deg (1st)}$$

が得られ、Second Overshoot Angle の許容値として、

$$[17.5 + 0.75 * (L/V)] \cong 27.3 \text{ deg (2nd)}$$

が得られる。よって本船の Z 試験で First Overshoot Angle と Second Overshoot Angle を確認し、上記の値を超えていない事を確認すれば本船の【保針・変針性能】が IMO の規格を満足していることになる。

Z 試験の実際の結果を図 5-7-2-3-1 に示す。図 5-7-2-3-1 を確認すると、First Overshoot Angle が 8.9° で許容値の 11.6° を満足している。Second Overshoot Angle に関しても 11.1° で許容値の 27.3° を満足している。よって、双方の Overshoot Angle に関して、定められている IMO 規格を満足していることから、Z 試験よる【保針・変針性能】に関して問題無いことが確認された。

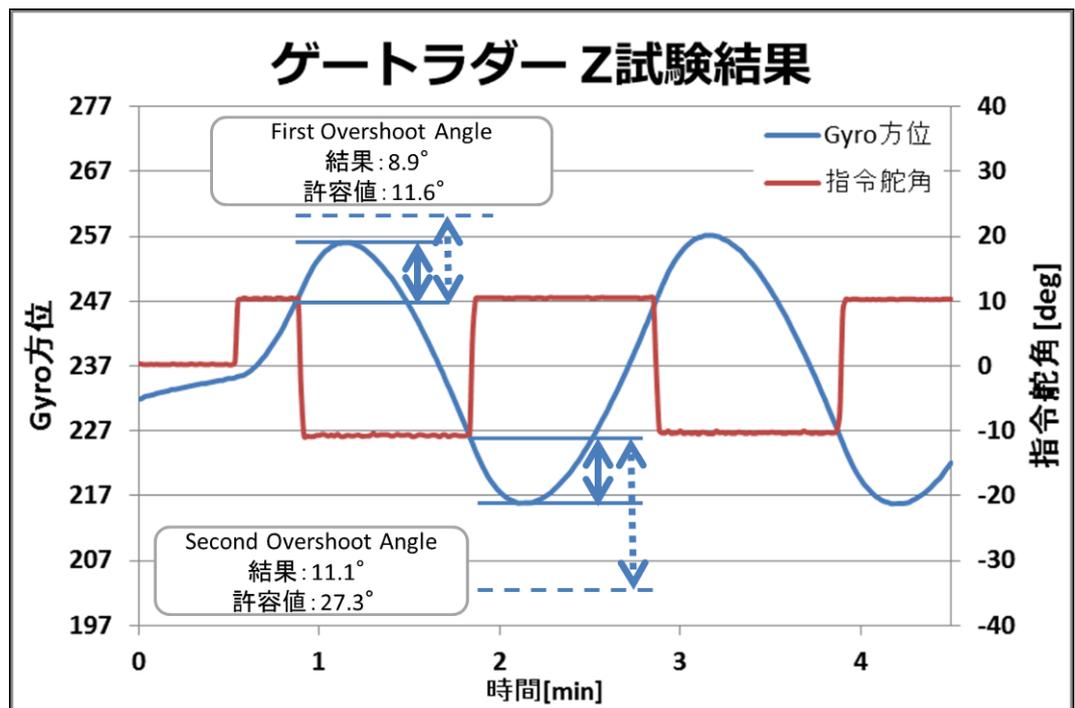


図 5-7-2-3-1 Z 試験結果



図 5-7-2-3-2 Z 試験海域

また、この試験結果により、図 5-7-2-3-3 に示す模型船の水槽試験結果から予測された【保針・変針性能】の妥当性が確認できた。

ZIG ZAG 試験結果
(前舵操舵※)

※ 計測装置の仕様から、
片舷のみ船体側へ操舵

----- IMO基準

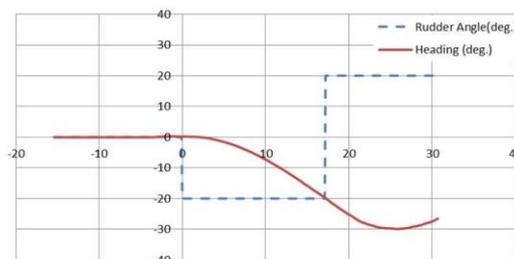
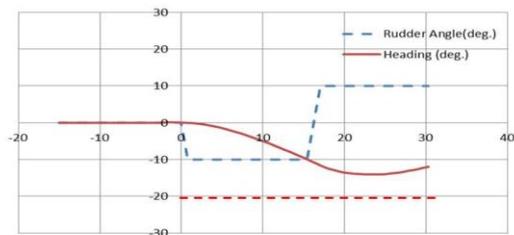


図 5-7-2-3-3 模型船の Z 試験結果

5.7.2.4 スパイラル試験

次に、より詳しく操縦特性を確認するためにスパイラル試験を行った。スパイラル試験は対象となる船の舵と旋回性能の関係を図解したもので、この結果により船の操船性がより詳しく把握出来る。特にオートパイロットでは一般的に、保針時に±5度、変針時に±10度の帯域を利用するので本特性を把握することが不可欠である。

スパイラル試験は縦軸に Rate Of Turn (ROT : 旋回角速度) を、横軸には Rudder (舵) をとったグラフである。ROT は舵を切った時にどれだけの速さで旋回するかを示す数値で、舵を大きく切れば、その分早く旋回する事を意味している。

船は船種によるが一般的に「安定船」「不安定船」に分けられる。図 5-7-2-4-1 はスパイラル試験の一般的な振る舞いを示している。船が「安定船(stable)」な特性は図 5-7-2-4-1 の曲線の中で実線に該当する。それ以外は Midship (舵角 0 度) 付近の舵特性が舵角の変化に対して反転しており、不安定傾向を持つ「不安定船(unstable)」と呼ばれる。

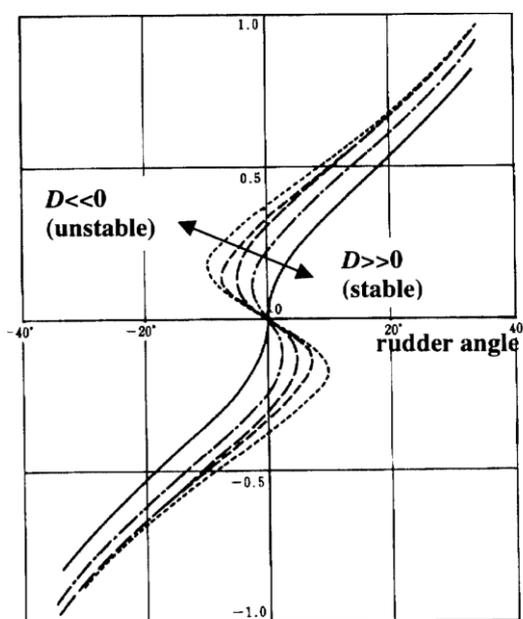


図 5-7-2-4-1 スパイラル試験(シミュレーション)の例*⁸

例：安定船

rudder angle = 5 度 → rate = 0.5 度/秒

rudder angle = -5 度 → rate = -0.5 度/秒

次ページにある図 5-7-2-4-2 の左図は不安定船の結果例である。安定船とは異なり、ある舵の幅で ROT が逆転する特性がある。右図は不感帯がある結果例である。不感帯

⁸ 芳村 (2000) : *Criteria for Yaw-checking and Course-keeping Abilities in IMO's Interim Standards for Ship Manoeuvrability*

では、ある舵の幅で ROT が著しく劣化する特性がある。このような特性があると操船が難しく、オートパイロットでは通常とは異なる調整が必要となる場合が発生する。

例：不安定船

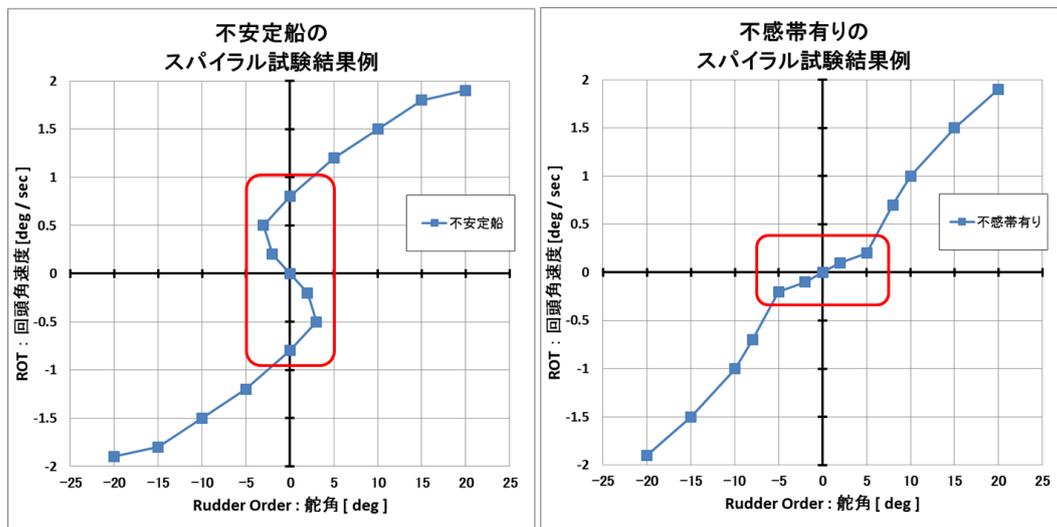
rudder angle = 5 度 → rate = -0.5 度/秒

rudder angle = -5 度 → rate = 0.5 度/秒

例：不感帯

rudder angle = 5 度 → rate = 0.2 度/秒

rudder angle = -5 度 → rate = -0.2 度/秒



左図：不安定船のスパイラル試験結果 例

└不安定船は狭帯域の舵効きの極性が逆転する。→肥大船など

右図：不感帯有りのスパイラル試験結果 例

└不感帯は狭帯域の舵効きが著しく劣化する。→特殊船など

図 5-7-2-4-2 不安定船と不感帯のスパイラル試験結果の例

5.7.2.5 スパイラル試験結果

今回のスパイラル試験結果を図 5-7-2-5-1 に示す。結果から不安定船で現れる舵の狭帯域における逆特性が見られず、通常舵装備船の微小舵角での動作と遜色ないことが確認できた。

山中造船 S1070 (しげのぶ) ゲートラダー スパイラル試験結果			
海域:大島沖		試験時間: 2017年 11月 03日 11時 00分 ~ 12時 45分	
エンテレ:FULL		エンテレ:HALF	
舵角[deg]	Rate[deg/sec]	舵角[deg]	Rate[deg/sec]
-20.20	-1.496	-20.57	-1.214
-14.94	-1.279	-14.94	-1.014
-10.64	-0.956	-10.48	-0.743
-6.77	-0.644	-6.45	-0.491
-4.87	-0.441	-4.35	-0.357
-2.32	-0.244	-1.90	-0.209
0.00	0.000	0.00	0.000
2.90	0.232	2.00	0.272
4.41	0.507	3.33	0.308
7.34	0.852	7.03	0.588
10.50	1.005	9.83	0.764
14.58	1.293	14.26	1.057
19.22	1.453	20.56	1.218
試験時 風向風速	5.0 ~ 13.0 kn 13.0 ~ 350.0 deg	試験時 風向風速	0.0~13.0 kn 13.0 ~ 350.0 deg

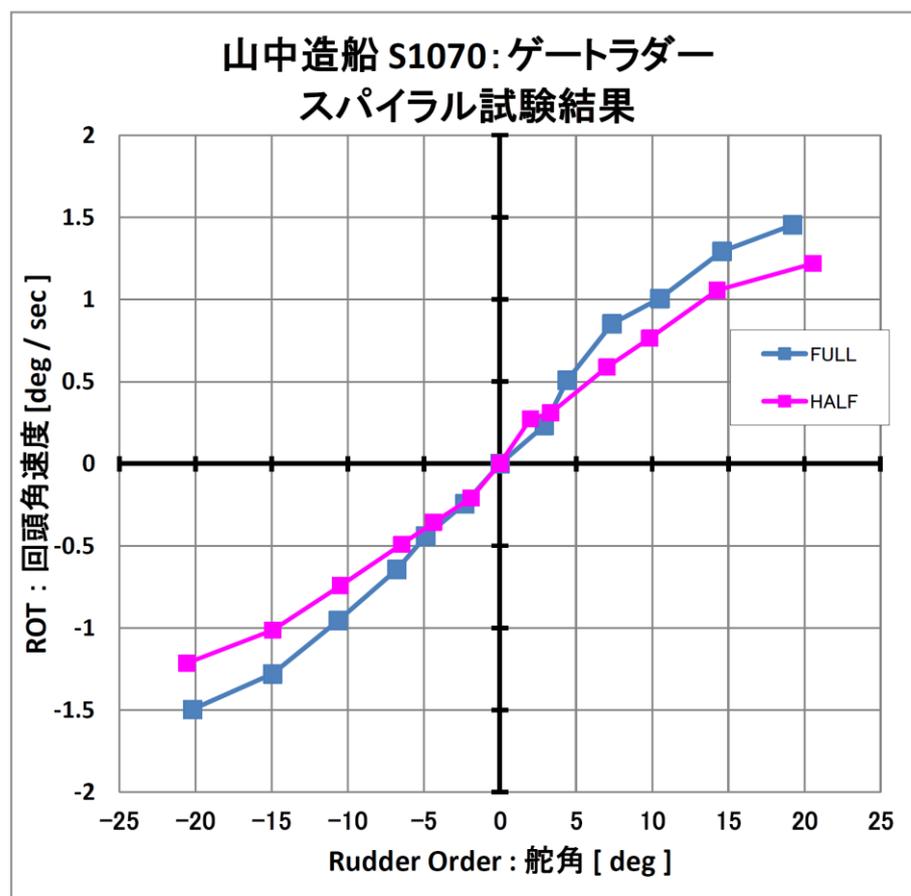


図 5-7-2-5-1 スパイラル試験結果

5.7.2.6 オートパイロット保針結果

オートパイロット保針性能に関して確認する。試運転では航海速力の 16.5kt と、航海速力に比べて低速な 12kt における保針性能の評価を行った。試験海域を図 5-7-2-6-1 に示す。

各船速における保針性能を確認すると、大きな方位誤差や Yawing など確認されなかった。保針性能に関しては JIS または ISO で定められており、船首方位の安定性⁹に関して

「外乱がない状態での船首方位の安定性は、設定針路と船首方位の差の平均値で表し、その平均値は $\pm 1^\circ$ 以内、かつ、最大値は $\pm 1.5^\circ$ 以内でなければならない。」

と定められている。表 5-7-2-6-1 から、方位誤差の平均値、最大値とも上記許容値内にあり、各船速において船首方位の安定性を満足していることが確認できた。

表 5-7-2-6-1 保針試験詳細結果

	12 kn 試験	16.5 kn 試験
(設定進路 - Gyro方位)の平均値 [deg]	-0.03	-0.15
方位誤差最大値 [deg]	1.20	0.60
方位標準偏差 [deg]	0.57	0.41
船速平均値 [kn]	12.18	16.52

* 方位標準偏差：設定針路に対する方位振れの量。



図 5-7-2-6-1 オートパイロット保針試験海域

図 5-7-2-6-2 に 16.5kt のオートパイロット保針試験結果を、図 5-7-2-6-3 に 12kt のオートパイロット保針試験結果を示す。

⁹ JIS F9604 : 2003 (ISO 11674 : 2000) 船舶及び海洋技術-船首方位制御装置 4.3.13

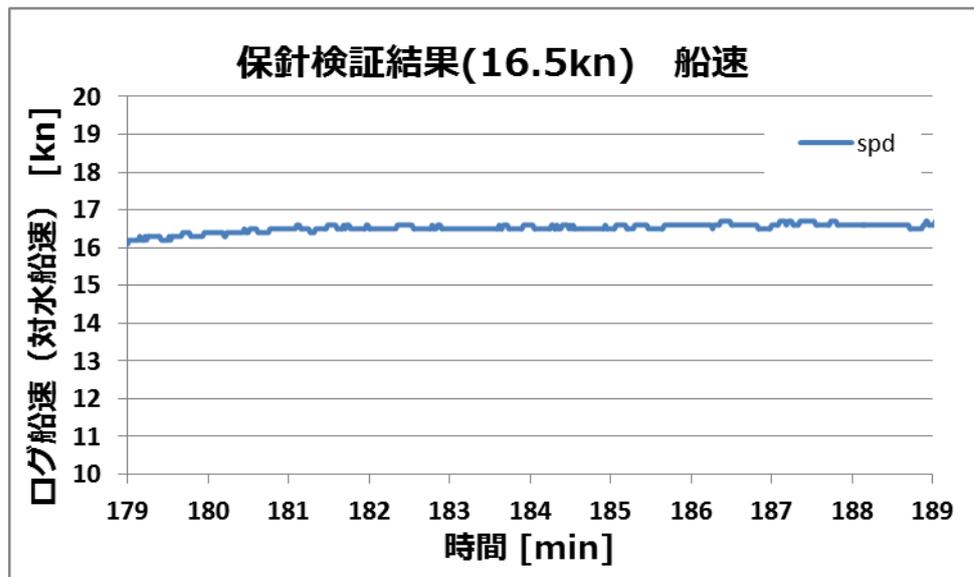
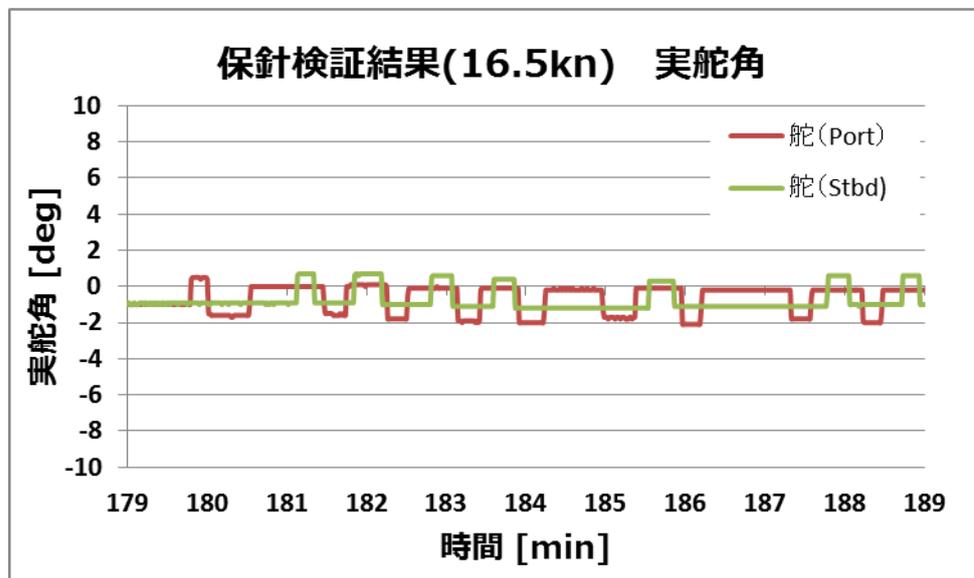
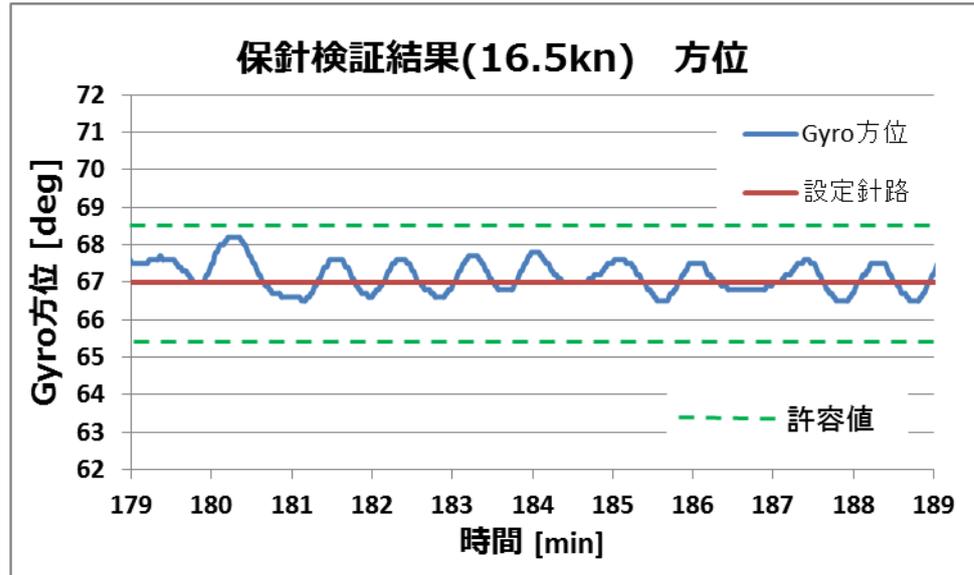


図 5-7-2-6-2 オートパイロット保針試験 16.5kn 結果

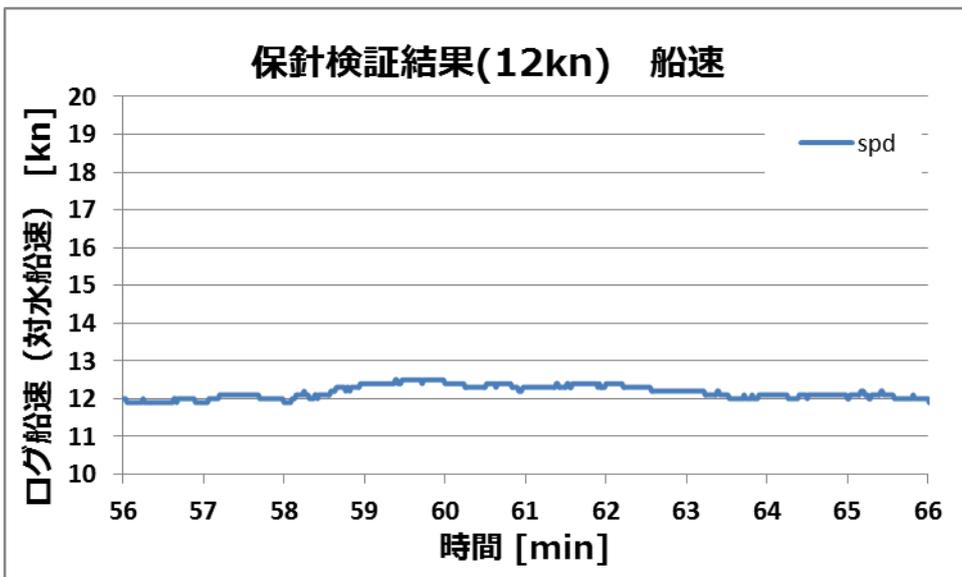
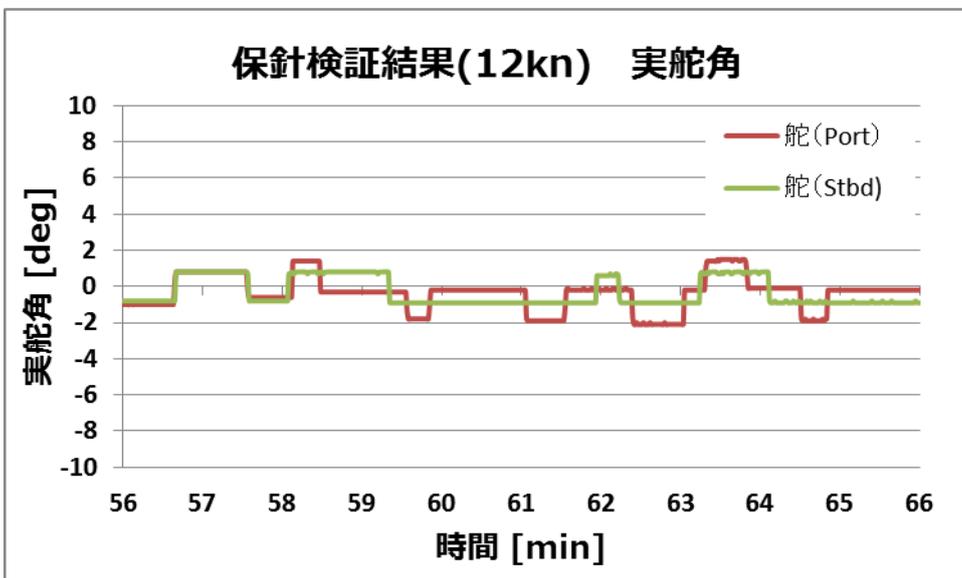
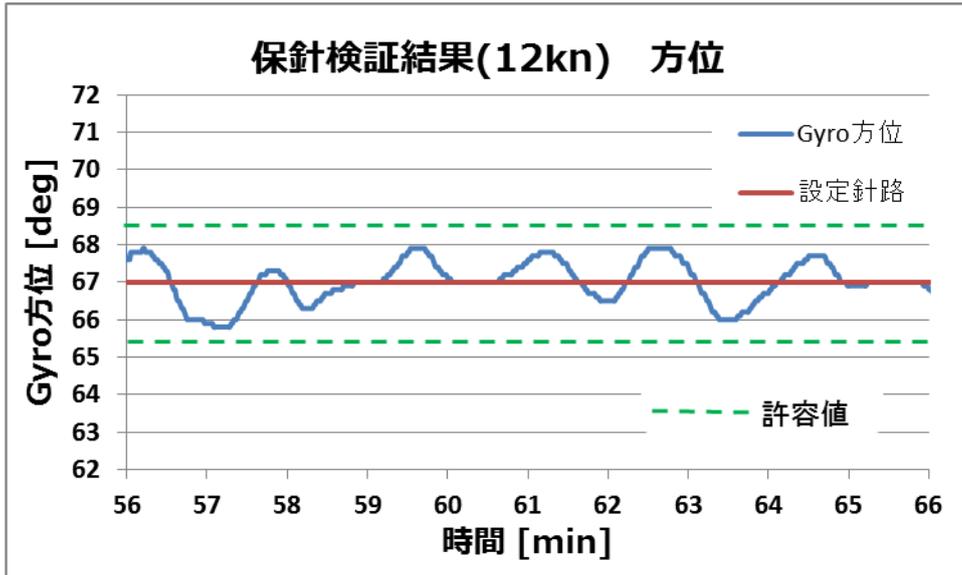


図 5-7-2-6-3 オートパイロット保針試験 12kn 結果

5.7.2.7 微速前進（クラビング）モード結果

図 5-7-2-7-1 に離着棧性能を重視して計画したクラビングモードの試験結果を示す。船首方位（矢印 1 本）と対地方位（矢印 2 本）に大きな差があり、ゲートラダーの舵板 2 枚を組合せによる横力により、船体がクラビング、カニ歩きのよう移動していることが確認された。この機能が実際の離着棧時にどの程度有効であるか平成 30 年度に調査する。

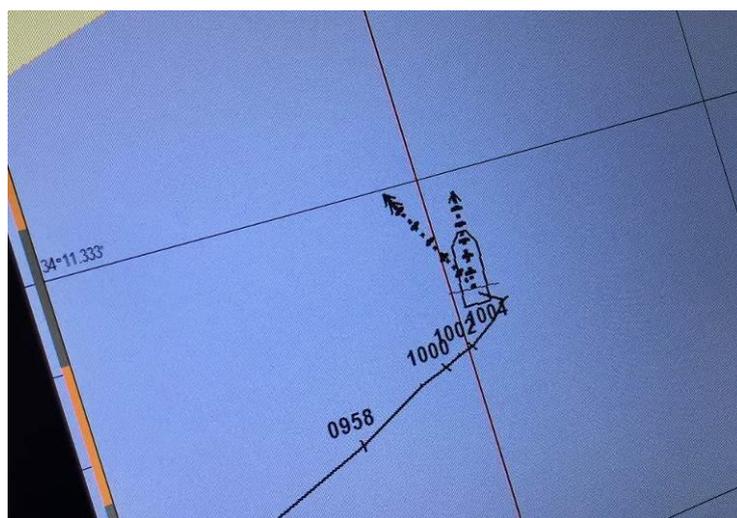


図 5-7-2-7-1 クラビング結果

5.7.2.8 旋回性能試験結果

模型実験で得られたゲートラダーの舵抵抗は非常に小さい。例えば、右20度の操舵において、フラップ舵がプロペラ推力の25%もの抵抗となっているのに対して、ゲートラダーは僅か5%、実に5分の1である。これは、実際の運航でどう現れるかという点、例えば、荒天中に波によって船首が大きく振れた場合に舵によって針路を戻そうとした場合にゲートラダーは、速力低下が小さく、速力回復に時間もかからないと考えられる。また、斜め風によって船首が風に立った場合に、あて舵により針路を維持する場合に、あて舵による抵抗増加が小さく燃費の改善につながる。さらに、非常に大きく天候が荒れた場合にも、速力低下が小さいため安全な運航につながると考えられる。この特徴を良く捉えたデータがある。両船の35度旋回試験である。

図5-7-2-8-1に、初速9ktでの35度旋回試験結果を示す。一見、フラップ舵の旋回力が上回っているように見えるが、実は、これは舵の抵抗が大きく船体を引きずり、速力が急激に落ちた結果、このような違いが生じている。例えば、6分後の船位を見ると、ゲートラダーは旋回を終了しているのに対して、フラップ舵はまだその途中であり、また定常旋回時の船速も、ゲートラダーがほぼ7ktであるのに対してフラップ舵は4ktまで低下している。すなわち、前で述べたように、フラップ舵は、舵力として旋回力が出ているのでは無く、ゲートラダーの5倍の舵抵抗で船の行き足にブレーキをかけながら旋回していると言っても良い。

図5-7-2-8-1の下図は、船体停止時の旋回力を比較したものであり、ここではゲートラダーの強力な操舵力が如何なく発揮されている。この船体停止時の海上試運転での旋回性能は、図5-7-2-8-2に示す模型船の水槽試験結果とよく一致しており、水槽試験結果の妥当性が確認された。

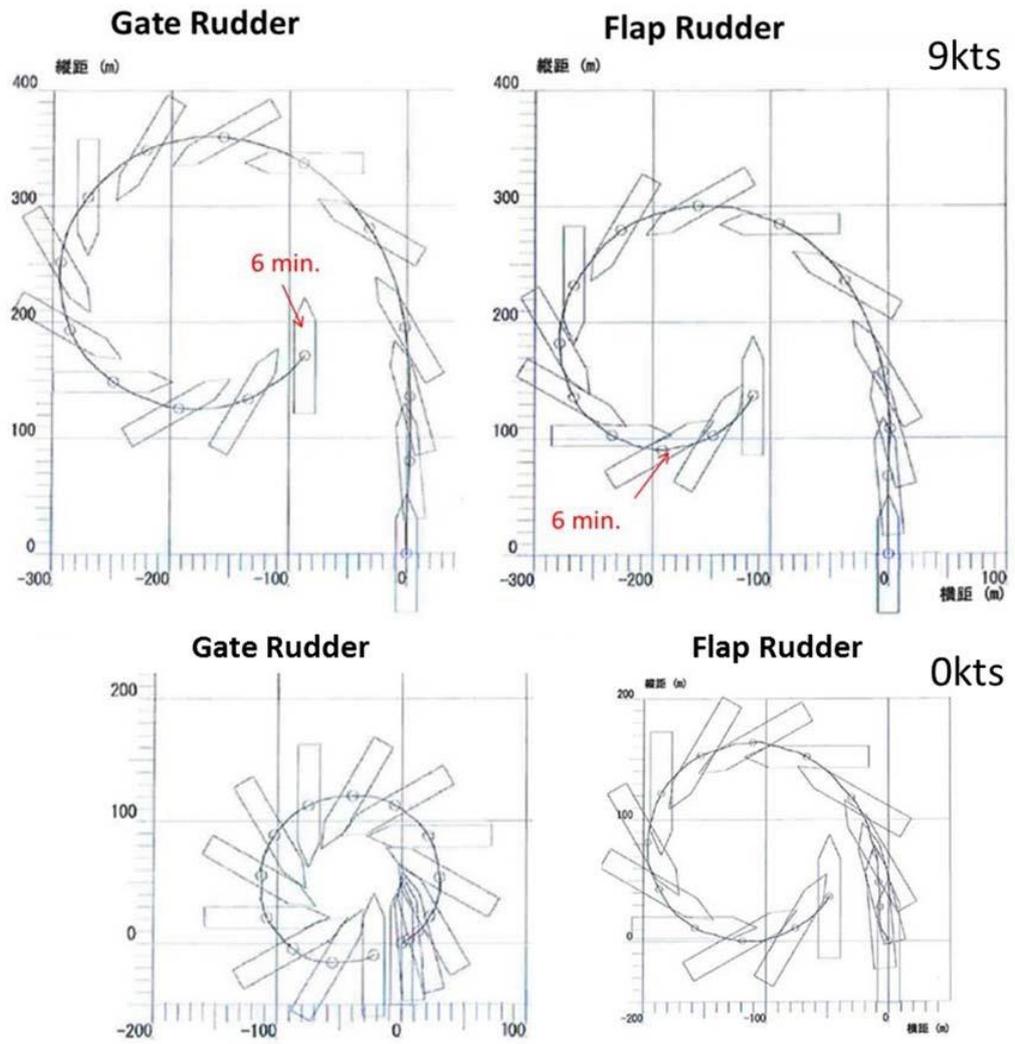


図5-7-2-8-1 旋回試験結果

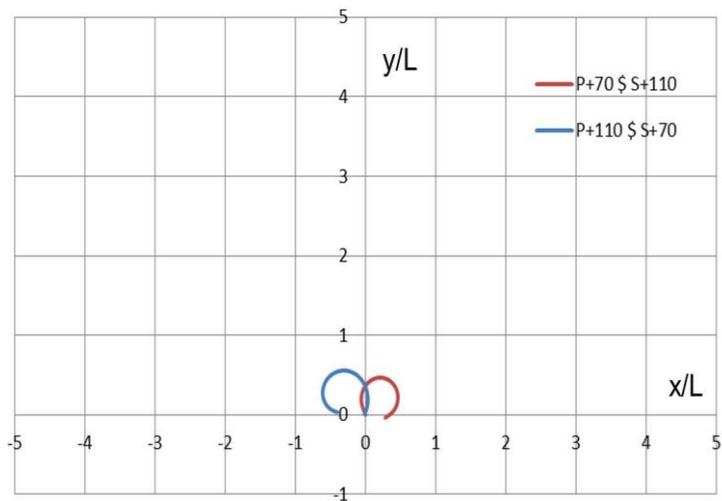


図5-7-2-8-2 模型船のその場旋回試験結果

旋回性能を確認するのにIMO操縦基準と比較してみる。IMO操縦基準では船長Lとして縦距(advance)は4.5L、旋回圏(tactical diameter)は5Lと設定されている。

試運転の結果より以下となった。

左旋回：旋回径 -366m ($-3.64 \times L_{pp}$)

最大縦距 377m ($3.75 \times L_{pp}$)

右旋回：旋回径 368m ($3.66 \times L_{pp}$)

最大縦距 376m ($3.74 \times L_{pp}$)

したがって、IMO基準をクリアした事が確認出来た。旋回試験での航跡記録を図5-7-2-8-3、図5-7-2-8-4に示す。

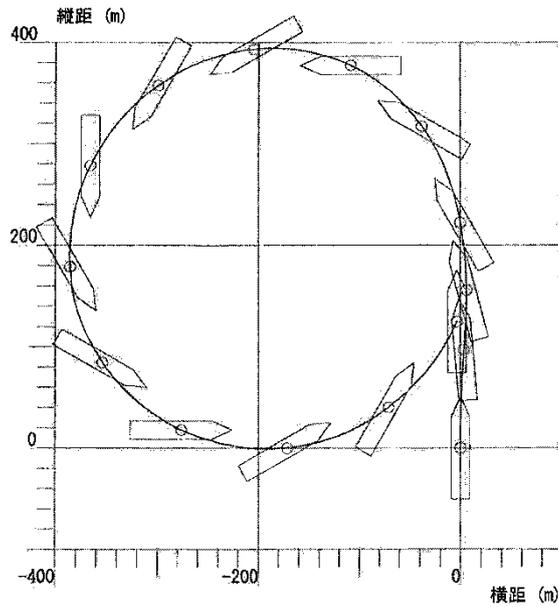


図5-7-2-8-3 左旋回試験結果

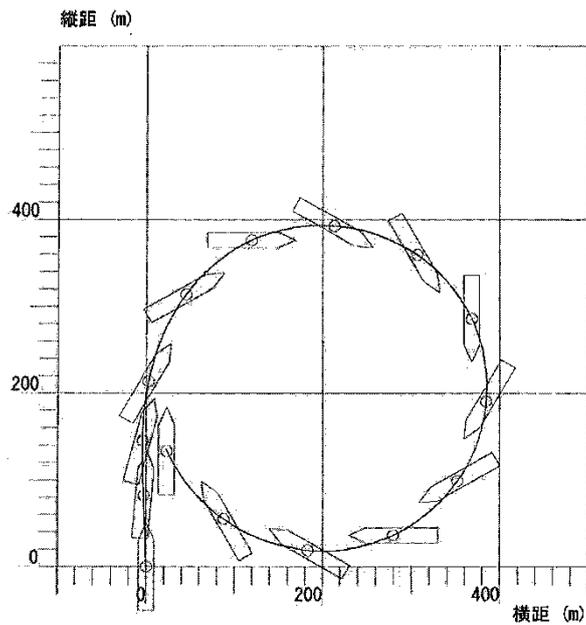


図5-7-2-8-4 右旋回試験結果

上記の海上試運転での結果は、図5-7-2-8-5に示す模型船の水槽試験結果で得られた傾向とよく一致しており、【旋回性能】についても水槽試験結果の妥当性が確認された。

旋回試験結果

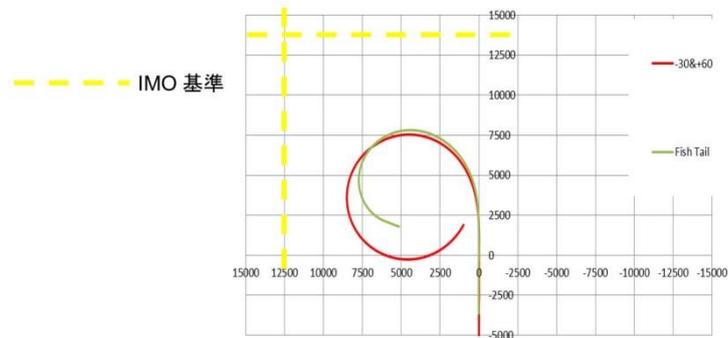


図5-7-2-8-5 模型船の旋回試験結果

5.7.2.9 停船性能試験結果

ゲートラダーを危急停止のアシストとする目的で、5.4.2の4)で述べた追加機能の検証を停船性能（危急停止、クラッシュアスターン）試験で実施した。左右舷の舵角をそれぞれ0°、-25°（船体側へ舵を近づける）、35°（船体から舵を離す）とした場合の航走距離、停止時間の比較を、表5-7-2-9-1に示す。

表5-7-2-9-1 危急停止試験結果

舵角	左舷	右舷	左舷	右舷	左舷	右舷
	0°	0°	-25°	-25°	35°	35°
前進速力	16.3kt		15.3kt		15.5kt	
後進翼角	-14°		-14°		-14°	
停止時間	3'05"		2'56"		3'25"	
航走距離	826m		687m		737m	

ゲートラダーを危急停止のアシストとして使用した結果、停止時間に大きな差がみられない結果から、開発関係者の意見によりクラッシュアスターン機能については、平成30年度に、後進推力が十分でない後進指令発令直後だけアシストする方などの検討を行うこととなった。

5.7.3 船内騒音・船体振動計測結果

海上試運転の速力試験の間に舵機室床の上下振動加速度を計測した。一般的に1軸船の舵機室ではプロペラ・キャビテーションの影響が大きいため、プロペラ翼数次の周波数成分の振動加速度が卓越して計測される。

今回、主機出力85%と100%の状態における舵機室床の上下振動加速度では主機よる振動

加速度成分の方が大きい結果となった。

図 5-7-3-1 に 85%出力の、また図 5-7-3-2 には 100%出力の計測結果を示すが、黄色の矢印で示される主機による周波数成分の方が、緑色の矢印で示されるプロペラによる周波数成分より大きく、過去の 1 軸船で計測されるスペクトルとは異なり、プロペラ起振力が小さいことが確認できた。

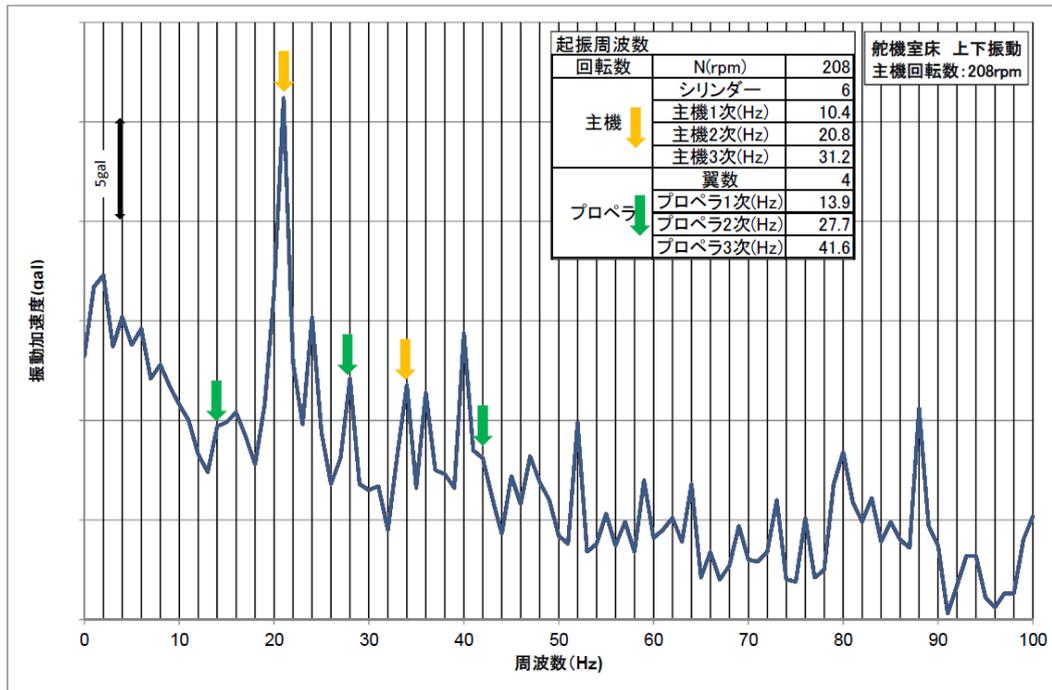


図 5-7-3-1 舵機室床 上下振動計測結果(85%出力: 208min⁻¹)

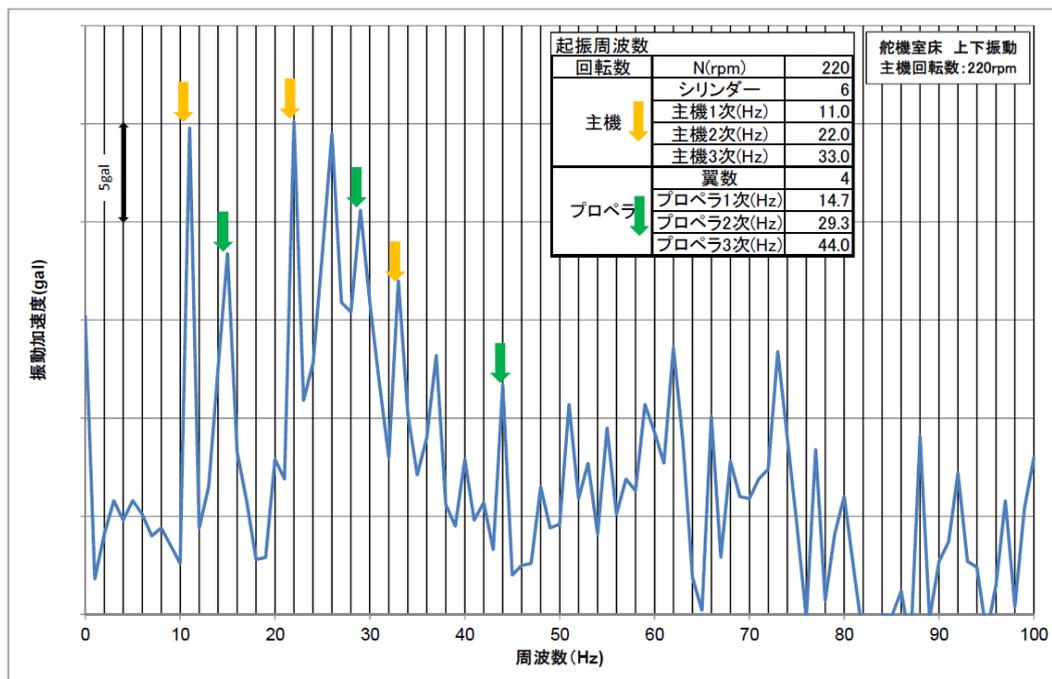


図 5-7-3-2 舵機室床 上下振動計測結果(100%出力: 220min⁻¹)

同じ速力試験の間に舵機室内での船内騒音も同時に計測した。図 5-7-3-3 に主機出力 50%、75%、85%での計測結果を示す。青色が試験対象船「しげのぶ」の計測結果であるが、比較可能なデータがある同型船「さくら」の計測結果を赤色で示す。

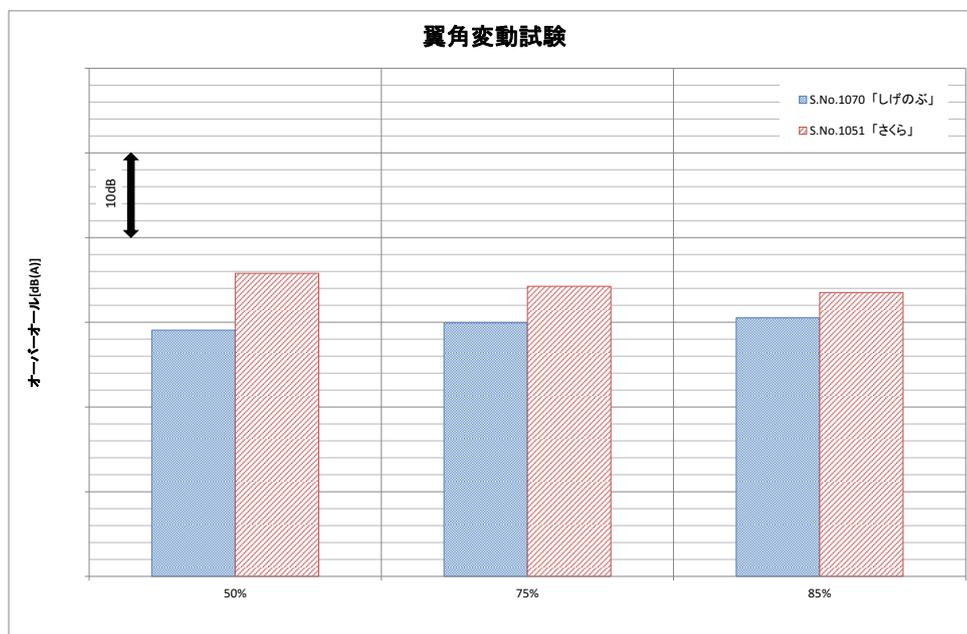


図 5-7-3-3 舵機室 騒音計測結果

計測結果の比較から、ゲートラダーを装備した試験対象船の方が同型船に比べて 3~5dB の騒音低減が確認された。

5.7.4 操舵トルク計測結果

転舵時の操舵機トルクが妥当であったか検証するため、海上試運転の 35 度旋回試験時に操舵機の油圧シリンダー内の圧力計測を実施した。図 5-7-4-1 は主機 100%出力時のシリンダー内圧力記録から換算された操舵トルク変化を示したものである。図の横軸は操舵開始後の時間(秒)を、また黄緑色破線は舵角の変化を示し、赤色破線は理論計算結果から予測された操舵トルクを示す。海上試運転の圧力計測値から換算されたトルクは赤色四角で示す。

操舵トルクの予測値と計測値はほぼ一致しており、操舵機選定に使用した操舵トルクの妥当性が確認された。このことからゲートラダーの操舵トルクの予測は正しく、同型船の操舵機(操舵機トルク 17t-m)が十分使用できることを確認した。

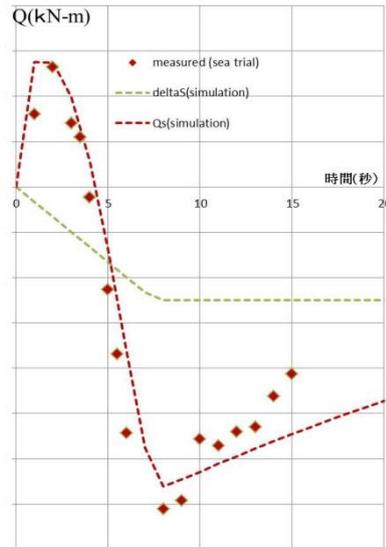


図 5-7-4-1 操舵トルクの予測値と計測値の比較

6. 目標の達成状況

2510 総トン型コンテナ船「しげのぶ」（山中造船 1070 番船）を対象として、ゲートラダーの実機を試作し、海上試運転で推進性能、操縦性能を確認した。

- 1) 「しげのぶ」の海上試運転での Z 試験と旋回性能試験の試験結果より、本船の保針・変針性能は IMO 基準を満足することが確認できた。
- 2) 同型船と同型の操舵機を使用した「しげのぶ」の操舵機シリンダー内圧力の計測結果から、ゲートラダーの操舵トルクは予想値に近く、目標値（17t-m 以下）とすることができた。
- 3) 「しげのぶ」が竣工した結果、「さくら」と同型でゲートラダー用操舵機 2 式を搭載できる船尾を設計できたことが確認できた。

7. 今後の予定

今年度の事業成果により、ゲートラダーの試作と海上試運転による基本性能を確認できたので、来年度は「しげのぶ」に乗船して、実航海中のゲートラダーの制御性や、ゲートラダーの省エネ性、振動・騒音性能等に関する諸データを収集し、ゲートラダーを使用した省エネ推進システムのチューニングを行い、制御フローを確立する。

8. まとめ

コンテナ船「しげのぶ」を試験対象船として選定し、ゲートラダーの設計、試作を行った。試作した実機を使用した省エネ推進システムを「しげのぶ」に搭載して海上試運転を実施した結果、以下のことが確認できた。

- 1) フラップ舵を搭載した同型船で、ゲートラダー用操舵機 2 式を搭載することができた。
- 2) 推進性能試験において予想どおりの最大速度を記録し、同型船「さくら」の試験結果と

- 比較して大きな馬力節減（省エネ）効果が確認できた。
- 3) 舵機室の騒音レベルを同型船の計測結果と比較した結果から、ゲートラダーの船内騒音低減への寄与が確認できた。
 - 4) 舵機室床の振動加速度スペクトルから、模型試験結果から予測されたとおり、プロペラ起振力の成分が小さいことが確認できた。
 - 5) 操縦性能試験において、目標通り IMO 基準を満たすことが確認できた。
 - 6) 低速での操縦性能においてクラビングモードを使用した結果、フラップ舵を装備した同型船よりも旋回径が小さいことが確認できた。
 - 7) 操縦性能試験で計測した操舵機シリンダー内圧力から換算されたゲートラダーの操舵トルクは、理論計算から予測された操舵トルク曲線にほぼ一致することが確認できた。
 - 8) 停船性能を向上させる目的で追加した機能は、危急停止試験の結果から効果が顕著でないと判断した。
 - 9) スパイラル試験の結果から、微小舵角でのゲートラダーの応答性に問題がないことが確認できた。

表 11-1-1 試験対象船と同型船の主要目比較

船名		「さくら」	「しげのぶ」
船番		1051	1070
建造年		2016年	2017年
船体	Lpp(m)	101.9	100.6
	B(m)	17.8	
	D(m)	8.8/5.29	
	d _M (m)	5.25	
主機	連続定格最大出力(kW)	3309	
	回転数(min ⁻¹)	220	
舵	タイプ	フラップ舵	ゲートラダー
プロペラ	タイプ	CPP	
	翼数	4	
	直径(mm)	3500	3300
	ハブ比	0.274	0.273
	EAR	0.53	0.512
	設計ピッチ比(0.7R)	0.69	0.835

ゲートラダーがプロペラ位置に装備されるため、「しげのぶ」は垂線間長（Lpp）が同型船よりも短くなっている。主要目、主機定格出力は同一だが、ゲートラダーのダクト効果によりプロペラ流入速度が大きくなるため、「しげのぶ」のプロペラ直径は小さくなり、設計ピッチ比も高くなっている。またプロペラ直径が小さくなることにより、可変ピッチプロペラ(Controllable Pitch Propeller: CPP)のハブ直径も小さくなっている。

11.2 航海記録の収集と同型船との比較

同型船「さくら」は、船型と主機が「しげのぶ」と同じでラダーシステムだけが異なるためゲートラダーの効果を知るには最適な船と言える。また、「さくら」は山中造船が誇る最新鋭のコンテナ船であり、造波抵抗を低減するエラ船型でもあるので、相対的な差は、そのまま絶対値においても優れていることになる。もちろん、ゲートラダー船の「しげのぶ」も同型船であるので、両船の比較に、エラ船型であることが影響することは無い。

「さくら」は、「しげのぶ」のほぼ1年前に建造されたため船体の汚損状況などが異なるのではないかと心配されたがダイバーによる目視確認では顕著な船体汚損は無いことが分かっている。

両船がラダーシステム以外は全く同じ仕様であることの他に、両船が同じ時期に同じ航路に就航したことも幸いした。就航後の性能比較において、同一時期かつ同航路という稀有な状況がもたらされたため、「さくら」との比較が、ゲートラダーの評価として最も適切であることは言うまでもない。

このような恵まれた比較条件のもと、試運転で確認された14%の馬力節減効果が、実運航でも持続できるのか、また、違った結果になるのかが、2年目の事業として非常に興味深いところでもあった。

まず、図11-2-1に、井本商運から送付された図11-2-2に示されるデータをそのままプロットした結果を示す。

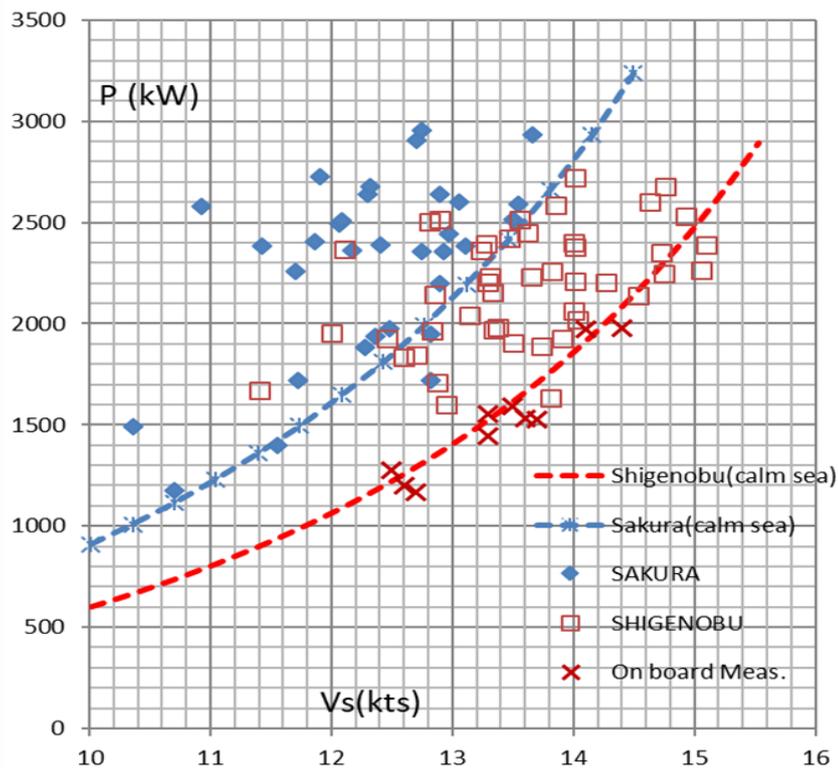


図 11-2-1 航海実績の比較 (船主データ ; 略同一航路)

航海実績の比較(ほぼ同一航路)

SHIGENOHU													
OUT	IN	Month	DAY	DATE	回転数	出力 (kW)	主機C	航走距離	航走時間	平均速力	載荷重量	噸水	噸水 (噸水)
津沖	東京	1	9	09/01/2018	213.0	2,416	6625	209.8	14.3	14.7	3886.8	4.94	5.1
東京	仙台	1	11	11/01/2018	214.0	2,392	6694	201.8	21.7	13.9	3397.89	4.51	4.86
八戸	東京	1	13	13/04/2018	215.0	2,469	13379	456.6	30.2	15.1	3182.05	4.4	4.73
横浜	仙台	1	15	15/01/2018	208.0	7880	266	18.1	13.9	3793	4.85	5.13	5.41
仙台	横浜	1	17	17/01/2018	214.0	2,402	9805	278	18.8	14.0	3375	4.74	4.99
横浜	苫小牧	1	18	18/02/2018	216.0	2,498	20091	448.9	38.6	13.8	3181	4.23	4.73
仙台	横浜	1	23	23/01/2018	214.0	2,237	10832	292.3	22.0	13.3	3569.5	4.5	5
八戸	東京	1	26	26/01/2018	212.3	2,695	14596	442.1	31.6	14.0	3622.1	4.9	5.03
横浜	仙台	1	28	28/02/2018	213.5	2,283	9423	186.1	20.3	13.2	3182.05	4.4	4.73
横浜	仙台	2	4	04/02/2018	213.76	2,376	8720	242.8	17.3	14.0	3900	4.46	4.88
仙台	横浜	2	5	05/02/2018	216.0	2,588	10979	278	20.3	13.6	3783.7	4.81	5.14
東京	八戸	2	8	08/02/2018	213.0	2,324	13362	440	30.8	14.3	3185.9	4.16	4.72
八戸	横浜	2	10	10/02/2018	214.0	2,469	18226	430	31.6	13.6	3783	4.76	4.98
横浜	苫小牧	2	13	13/02/2018	212.3	2,313	18895	548.2	40.2	13.6	3830	4.8	5.16
苫小牧	横浜	2	16	16/02/2018	213.6	2,270	20885	572.9	38.8	14.8	3748	4.55	4.99
横浜	苫小牧	2	20	20/02/2018	213.9	2,323	18890	541.5	40.7	13.3	3800	4.88	5.18
苫小牧	東京	2	24	24/02/2018	213.8	2,214	18030	533.4	38.3	14.0	3592.1	4.49	4.84
東京	八戸	3	10	10/03/2018	203.2	2,502	16190	451.8	32.3	14.0	2806	5.8	4.66
八戸	東京	3	11	11/03/2018	203.2	2,516	16020	429	30.8	13.8	3718.5	5.02	5.14
津水	東京	3	3	03/03/2018	197	5600	129	9.9	13.0	3817.8	4.65	5.01	
横浜	仙台	3	3	03/03/2018	198	9598	286	18.0	15.1	3722	4.77	5.13	
仙台	横浜	3	3	03/03/2018	199	9790	274	21.3	12.9	3244	4.58	4.72	
東京	八戸	3	11	11/03/2018	191	15183	439	28.8	14.8	3251.6	3.84	4.36	
八戸	仙台	4	7	07/03/2018	192	8636	178	12.3	14.33	3044.9	4.43	4.69	
仙台	横浜	4	7	07/03/2018	193	7810	271	21.8	12.46	3424.9	4.58	4.84	
東京	仙台	4	7	07/03/2018	194	10879	281	21.2	13.28	3794.1	4.85	5.14	
八戸	横浜	4	7	07/03/2018	195	12965	423	33.6	12.60	3513.9	4.65	4.99	
八戸	仙台	4	7	07/03/2018	196	7865	287	22.2	12.95	3749.2	4.8	5.14	
仙台	八戸	4	11	11/04/2018	197	1552	9052	182	13.3	13.81	2892.6	4.26	4.62

SAKURA													
OUT	IN	MONTH	DAY	DATE	回転数	P(kW)	主機C	kg	航走距離	航走時間	平均速力	載荷重量	噸水 (噸水)
横浜	苫小牧	1	10	10/01/2018	202.5	2418.879	20469	20469	553	41.58	12.4	2529	4.7
苫小牧	東京	1	12	12/01/2018	202.5	2064.816	1798	17980	548	42.50	12.9	3210	3.94
横浜	苫小牧	1	16	16/01/2018	202	2001.945	2122	21220	545	42.50	12.8	3781	4.49
横浜	苫小牧	1	24	24/01/2018	200.4	2008.563	21.87	21870	552	44.67	12.4	3878	4.53
宝塚	東京	2	4	04/02/2018	201.3	2422.185	20901	20901	637	46.17	12.1	3183	4.08
横浜	苫小牧	2	7	07/02/2018	207.6	2680.29	22258	22258	593	40.83	13.5	3122	4.45
苫小牧	石巻避難	2	10	10/02/2018	208.6	2660.436	12.58	12580	298	22.83	13.1	2498	3.88
横浜	仙台	2	18	18/02/2018	199.3	2309.682	8.623	8623	277	29.67	11.7	2498	4.38
仙台	横浜	2	19	19/02/2018	200.8	2415.132	9.737	9737	273	21.42	12.7	3768	4.44
東京	仙台	2	21	21/02/2018	202.5	2448.66	9.921	9921	274	25.08	10.9	3052	3.99
仙台	八戸	2	22	22/02/2018	202.3	2494.986	6.568	6568	181	13.25	13.7	2150	3.63
八戸	仙台	2	25	25/02/2018	196.2	1677.663	5.128	5128	178	14.50	12.3	2558	3.67
仙台	横浜	2	26	26/02/2018	201.3	2422.185	20901	20901	637	46.17	12.1	3183	4.08
八戸	東京	3	4	04/03/2018	200.2	2521.458	17.957	17957	443	36.67	12.1	2540	4.41
苫小牧	東京	3	11	11/03/2018	208.2	2710.071	21.407	21407	556	43.75	12.7	2839	3.85
苫小牧	東京	3	17	17/03/2018	207.7	2703.493	22.856	22856	564	44.25	12.7	2809	3.71
横浜	大原湾	3	20	20/03/2018	200.8	2402.334	12.864	12864	277	21.25	11.4	3628	4.26
大原湾	苫小牧	3	23	23/03/2018	204.4	2746.47	12.178	12178	293	24.67	11.9	3628	4.26
苫小牧	東京	3	25	25/03/2018	194.8	19480	550	44.75	12.3	2811	3.74	4.44	
苫小牧	横浜	4	1	01/04/2018	8.414	18414	545	44.25	12.32	2586	3.7	4.33	
横浜	苫小牧	4	4	04/04/2018	6.534	18534	536	47.08	11.38	3752	4.03	4.69	
苫小牧	横浜	4	7	07/04/2018	6.203	20900	557	41.25	13.50	2625	4.06	4.69	
横浜	苫小牧	4	11	11/04/2018	1.835	21835	560	46.00	12.17	4025	4.34	5.01	
苫小牧	八戸	4	14	14/04/2018	4.264	4264	133	12.83	10.36	3647	4.46	5.11	
八戸	横浜	4	15	15/04/2018	6.773	18773	429	36.58	11.73	4206	3.71	4.38	
横浜	名古屋	4	19	19/04/2018	5.947	5947	206	22.33	9.21	4208	3.71	4.38	
名古屋	向島	4	20	20/04/2018	9.02	9020	283	21.58	13.11	2621	3.69	4.32	
向島	響灘	4	27	27/04/2018	195.4	1900.4	4.3	4300	153	17.50	8.74	2631	3.69



図 11-2-2 航海実績の比較

就航直後、「しげのぶ」だけが、「さくら」に比べて異常な低ピッチ、15回転(8%)以上も高い回転数で運航されるという人為的なエラーがあった。燃費の悪化もさることながら、プロペラのフェイスキャビテーション発生というリスクも大いにあったが、これもダイバーチェックでプロペラの健全性が確認され、その後は「さくら」とほぼ同じ回転数で運航されている。したがってアブログデータの比較は、この正規の回転数に戻ってからの1月からとしている。

就航実績解析は船主殿から送付されたアブログデータに基づき、以下の処理を行った。

- (1) 航海時間が10時間未満のものは比較対象から除外
- (2) 計算上の主機燃費率が異常に良い(150g/kW hrs以下)データは除外

上記(1)は、港湾での運航が主で加減速が多く、性能の比較には適さない。(2)は、馬力の単位としてkWではなくPSで入力されたことによるミスと考えた。上記のようなフィルターをかけた後、次式に示すアドミラルティ係数とトンマイルを計算した。ここでDWTは載貨重量(トン)、FOCは燃料消費(トン)、Lは航走距離(マイル)である。

$$C_{adm} = \frac{Vs^3 DWT^{2/3}}{BHP}$$

$$\frac{\text{ton}}{1000\text{mile}} = \frac{FOC}{L} \left(\frac{12.5}{V_s}\right)^2$$

前述のスクリーニングを施した後の解析結果を図 11-2-3 に示す。

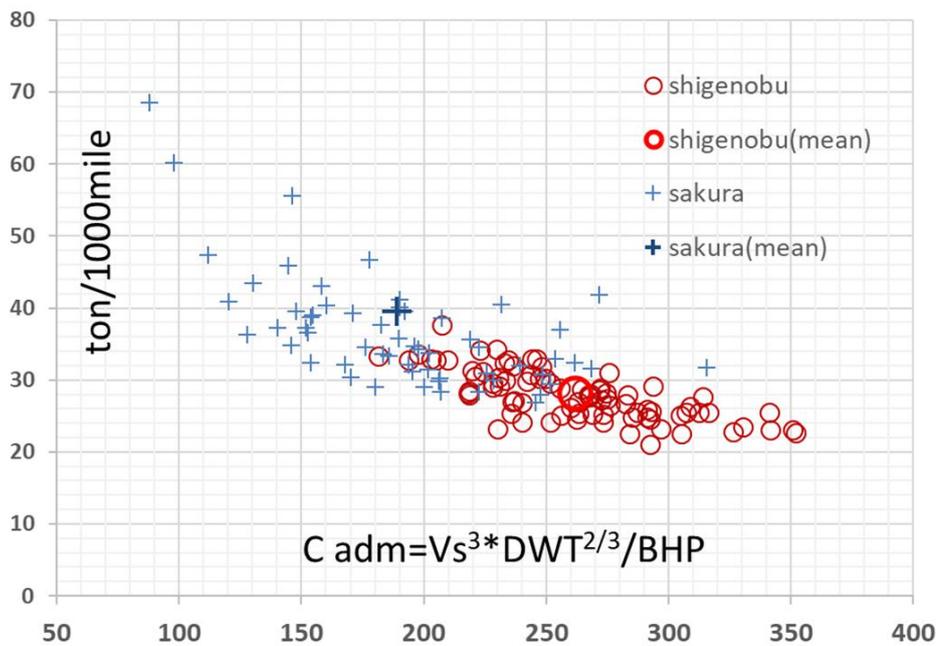


図 11-2-3 航海実績の比較（アドミラルティ係数とトンマイル）

この図から、以下のことがらが判明した。

(1) 船の推進性能を表すアドミラルティ係数は、両船で大きく異なり、「しげのぶ」のアドミラルティ係数は「さくら」に比べて 30% 近く良いと言え、これは試運転で得られた馬力節減（省エネ）効果 14% を大きく上回る。

(2) 燃費でも 30% の改善が見られ、馬力と燃費の関係には十分な整合性がみられる。一方、期間的には 4 ヶ月間だけなので、図 11-2-3 にあるすべてのデータが含まれている訳では無いが、オペレータである井本商運も独自に本船の燃費について調査を実施された。その結果を図 11-2-4 に示す。

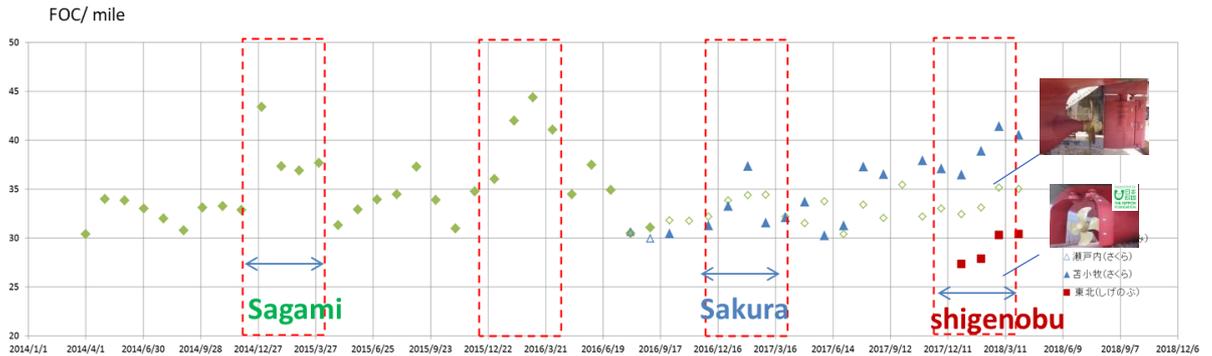


図 11-2-4 船主によるトンマイル航海実績の比較（1ヶ月単位の集計）

この図は、横軸に期日、縦軸にトンマイルを示している、一番早く建造されたやや船型の異なる類似船「さがみ」、同型船の「さくら」、および「さくら」のフラップ舵をゲートラダーに変更した「しげのぶ」の3隻が示されている。この図から、次の2つの視点での比較整理が可能である。

- (1) 現状での比較（時期は同じであるが、「さがみ」は航路が異なる）
- (2) 建造時にできるだけ近く、かつ航路と季節が同じ（冬季）データでの比較

図 11-2-4 の赤枠で囲んだ箇所が、冬季のデータであり、「さがみ」も当初は北海道航路に就航した。

「さがみ」の実績例から明らかな航路影響が認められたので、(2)のケースを正しい評価と考え、図 11-2-5 を作成した。この図は、現時点で「さくら」を「しげのぶ」に変えて運航すると 26%の燃料削減が可能であることを意味していて、前出の長期的に調べて得られた燃費削減量の約 30%とも符合する値である。また、「さがみ」と「さくら」は、この期間においては、ほぼ同じような燃費性能を示しているが、「さくら」は 2016 年、「さがみ」は 2014 年の北海道航路、冬季データなので、その差を議論することはできない。

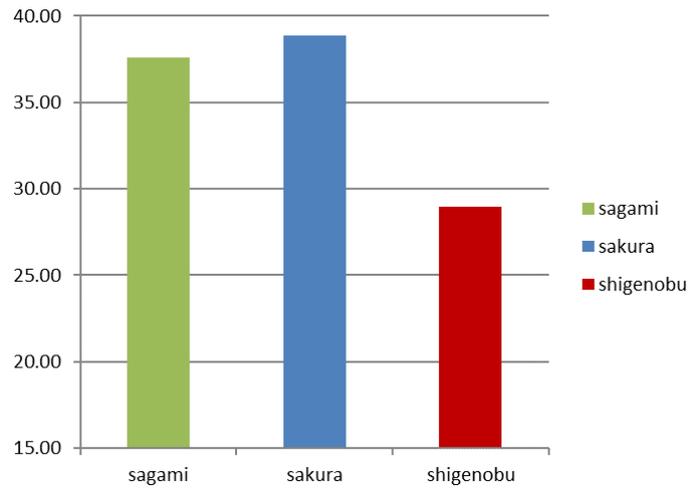


図 11-2-5 就航実績の比較 (トンマイル)

11.3 オンボード計測

2018年4月11日～13日にかけて実施されたオンボードでの計測結果および東京計器が搭載した自動計測装置の情報から、「しげのぶ」の推進性能を正確に把握することができた。

その結果を纏めると、以下のようなになる。

- 「しげのぶ」の燃費性能は、実運航においても試運転で計測された燃費性能とほとんど変わっていない。すなわち、「さくら」が試運転で示した燃費性能よりも14%上回っていることが判った。
- 上記は、オンボードで計測された風や波の影響を除去したものであるが、データには追い風のデータもあり、修正量が小さいことから、精度は良いと思われる
- 「しげのぶ」のデータは、横揺れが6～8度あった最も海象の悪い時期においても、あて舵は10度以内にとどまっておリ、平均では7～8度となる。

なお、オンボードで得られたデータの修正には、あて舵の影響を考慮していないが、これは後述するようにゲートラダーのあて舵による抵抗増加が極めて小さいことから、無視しても良いものと考えた。あて舵の影響を考慮すると、「しげのぶ」の平穩時の性能はさらに良いものとなる。

オンボード計測前の「さくら」と「しげのぶ」の運航データ（2018年1月から3月）を図11-3-1および図11-3-2に示す。図11-3-1は、排水量がそれぞれのデータで異なったままの生データであり、図11-3-2は、すべてのデータの排水量を6000tonに修正して馬力を推定した結果である。図中に示される1つのマークは、一航海ごとの平均値を示す。

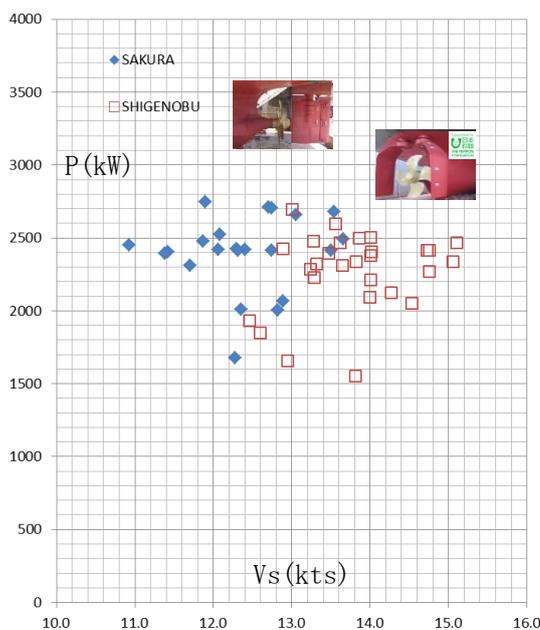


図 11-3-1 就航実績の比較

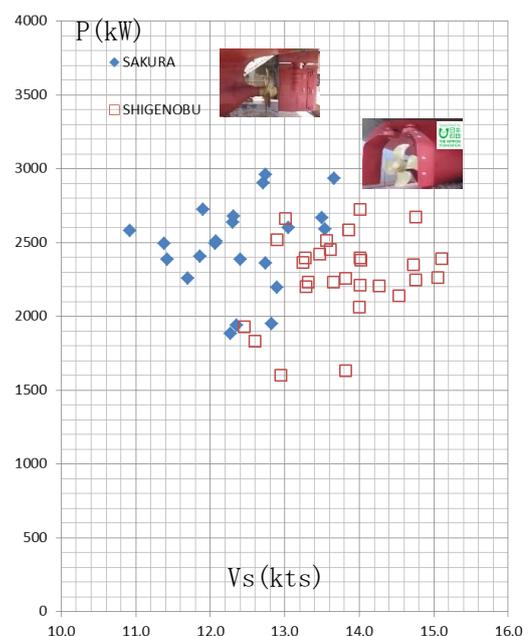


図 11-3-2 就航実績の比較（排水量修正）

両者は、大きくは違わないが、より纏まりもあり精度も高いと考えられる図 11-3-2 で議論を進める。図 11-3-2 は、一航海の平均データであるため、さまざまな理由、特に波や風などの外乱の影響でバラつきが生じるが、試運転やオンボード計測は、その時の外乱の状態を把握し、それらを除去することで静穏な状態での船の燃費性能を捉えることができる。したがって、試運転結果およびオンボード計測の結果を図 11-3-2 に加えてプロットし、図 11-3-3 を作成した。

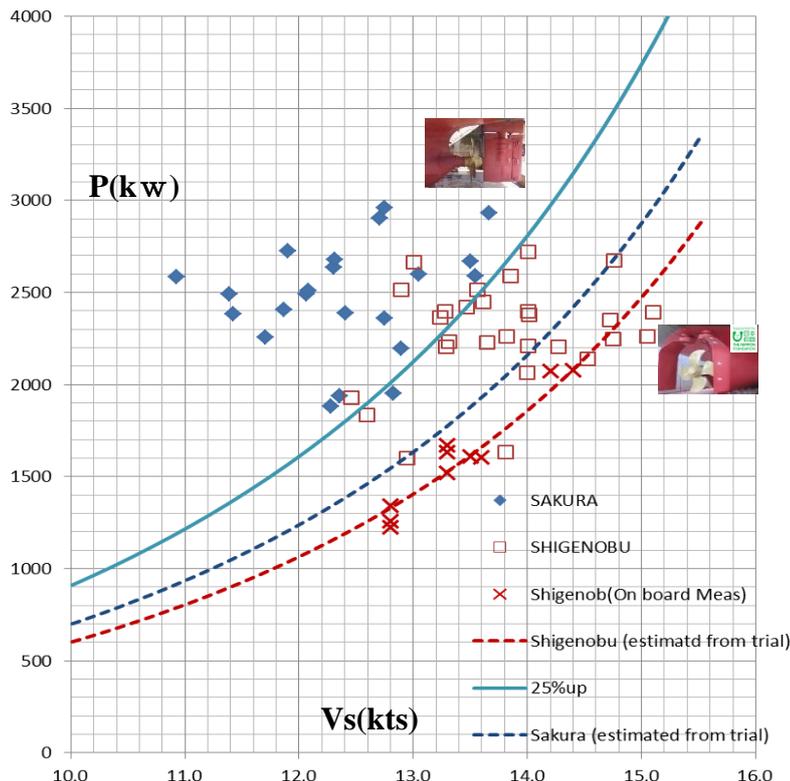


図 11-3-3 冬季就航実績の比較 (略同一航路)

図 11-3-3 から見えてくる事実は以下のとおりである。

- (1) 「しげのぶ」のオンボード計測結果は試運転結果からの推定ライン（赤点線）に極めて近い。
- (2) それに比べ、この時期の「さくら」は約 25%の悪化が見られる。これは冬季であるため船の揺れが大きく、後述する横風によるあて舵抵抗も大きいためと考えられる。

以下、オンボード計測について詳細に説明する。オンボード計測は、第三者による計測が良いであろうとの判断から、大学が所有する研究船などこれまで多くの実船計測を実施してきたニューキャッスル大学の Serkan Turkmen 博士に依頼した。

Turkmen 博士は、そのあと、世界で初めてゲートラダーを装備してのプロペラのキャビテーション試験を大学のキャビテーション水槽で実施している。

図 11-3-4 に、オンボード計測を実施した計測地点を示す。外乱は、風と波を考慮した。潮流については、GPS と電磁ログの両方を比較したが、ほぼ同じ値を示していた。したがい、どちらで解析してもほぼ同じ結論が得られるが、ここでは電磁ログを用いた解析を実施した。風はブリッジにある風向風力計、波は目視としキャプテンの確認ももらった。また風についても陸上の气象台からの情報と照らし合わせ、十分な精度が確保されていることも確認した。

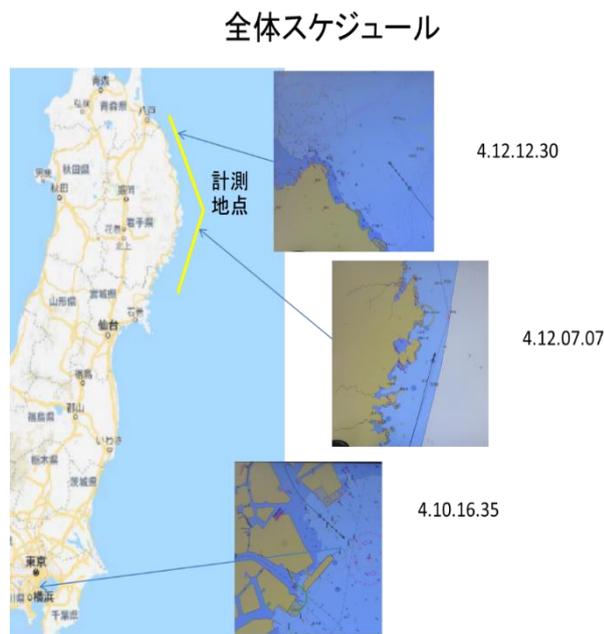
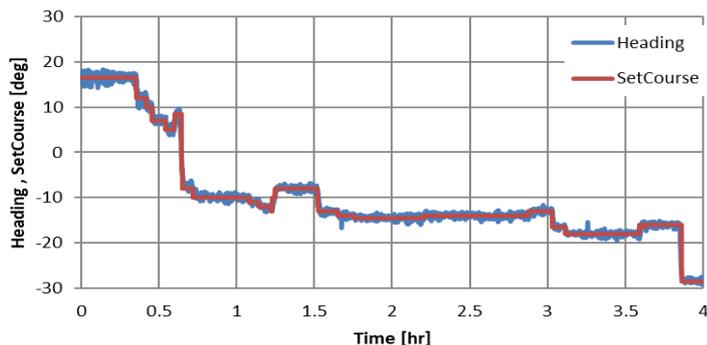


図 11-3-4 オンボード計測実施地点

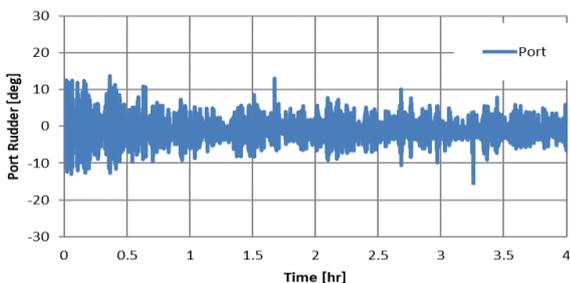
計測は、主機ロードが異なる 3 点で行い、またその中でも数点のデータが得られるよう合計 10 点のデータを取得した。海象については、前述したように横波と横風によるローリングが激しい状況であった。

計測時の船の転針の様子および同時期の操舵状況の一例を図 11-3-5 に示す。転針の様子からは、強い横風においても実際の指令と船の針路が良く一致していることが分かる。また、興味深いことに横揺れがあったにも関わらず船の速力はそれほど低下せず、図 11-3-6 に見られるように、性能指標であるアドミラルティ係数の低下がほとんど無かった。

SHIGENOBU Heading, SetCourse



SHIGENOBU Port Side Rudder



SHIGENOBU Stbd Side Rudder

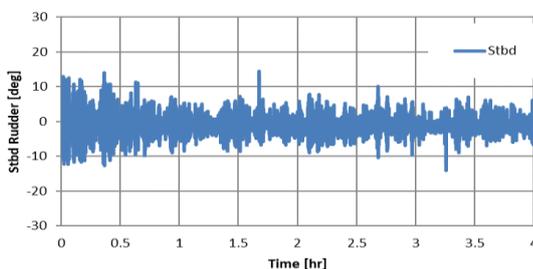


図 11-3-5 オンボード計測時の操舵および変針記録

アドミラルティ係数で見る航海ごとの平均性能

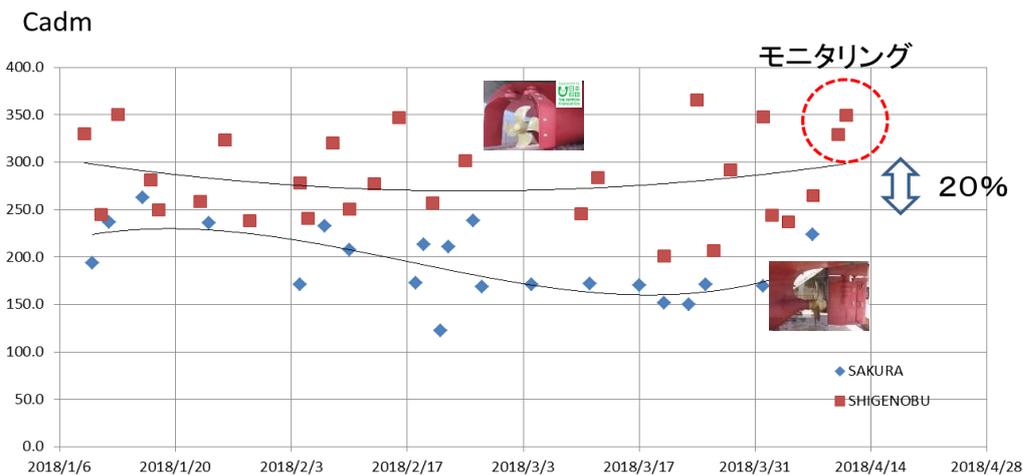


図 11-3-6 アドミラルティ係数の比較 (略同一航路)

さらに燃料指標でもあるトンマイルも、図 11-3-7 で見られる通り同型船の「さくら」より小さいことは全体を通して言えるのだが、このような横揺れがやや大きい状況の方がトンマイルはやや小さく燃費性能が優れるともいえる傾向が見られた。もちろん短期的なデータであり、潮流についてもログとGPSの違いがほとんどないということから無視しているので、

正確な情報とは言えない部分もある。実際に波浪がある方がやや燃費が良いかどうかは今後の調査対象である。

トンマイルあたり燃料消費で見る航海ごとの平均性能

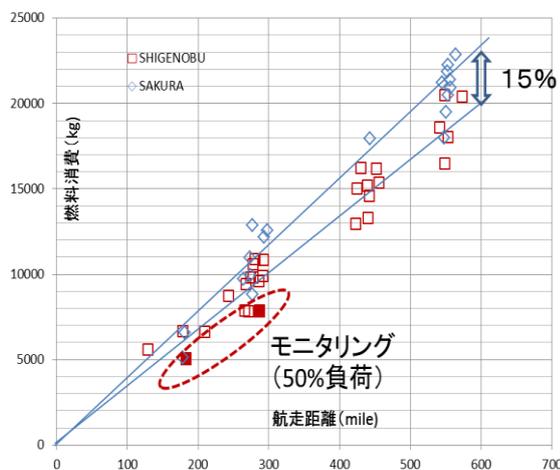


図 11-3-7 航走距離と燃料消費の関係

これについては、ニューキャッスル大学で、ゲートラダー付きコンテナ船が波の中で少し前進するという現象を学生が発見し、もっと積極的に推進に利用できないかに行ったゲートラダーの波浪エネルギー推進の実験が存在することを付記し、実験の様子を図 11-3-8 に示す。

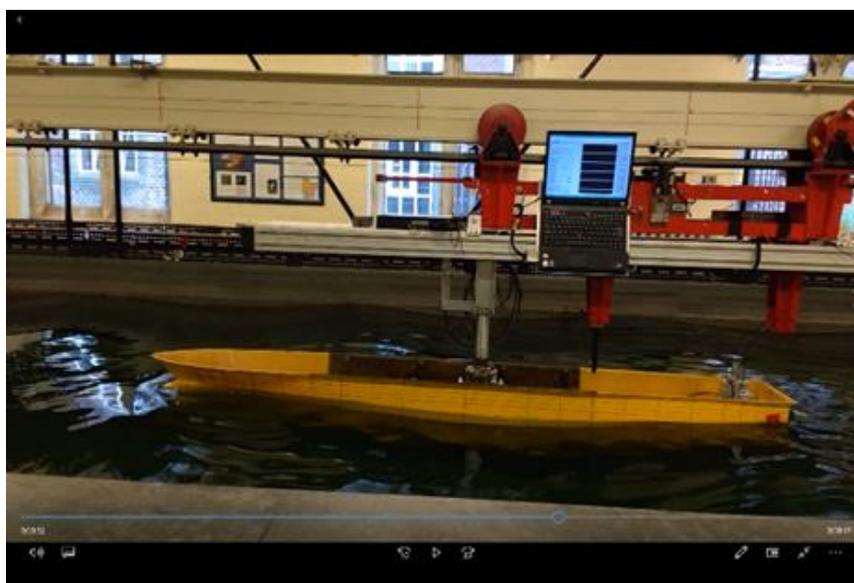


図 11-3-8 ニューキャッスル大学におけるゲートラダー波浪推進実験

次にブリッジで計測された風速について、近く（八戸）の気象台で得られたデータと比較して図 11-3-9 に示す。やや小さめに計測されている傾向はあるが、船の性能修正をやや小

さくする傾向にあるので、性能の特定としては安全側ともいえる。当時、ブリッジの風はほぼ真横からであったので、障害物の影響でやや小さめの風速になった可能性は否定できない。繰り返しになるが、修正量が小さくなる方向なので、ゲートラダーの性能を過大評価することにはなっていない。

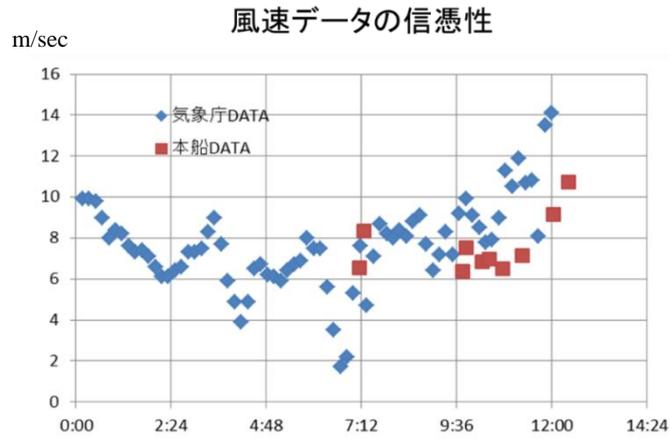


図 11-3-9 試験時の風速データ

図 11-3-10 にオンボード計測時の航路と当時の海象が確認できる写真を示す。



図 11-3-10 オンボード計測時の航路と海象

波および風の修正結果

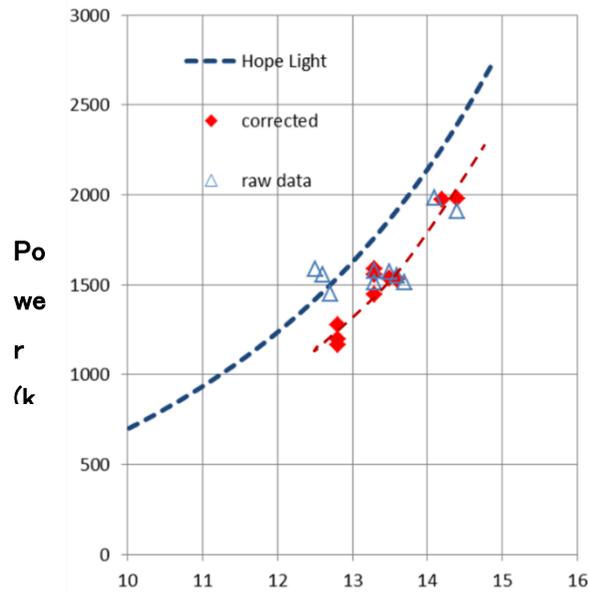


図 11-3-11 オンボード計測解析結果

風および波による抵抗増加は、海上技術安全研究所が提案した簡易法を用いているが、図 11-3-11 に示されるとおり、計算された結果は、通常舵を装備した船型の馬力曲線を表すと考えられる HOPE Light(船舶推進性能推定プログラム)が示す馬力曲線(青点線)とほぼ並行であった。これは合理的な修正がなされたと考える根拠とも言える。

これまでのアブログデータに加え、オンボード計測で得られた計測点を追加し同型船のアブログデータと比較し図 11-3-12 に示した。2 船型の同一船速での馬力差は明らかに 30% 近くあり、その差は驚異的とも言える。ましてや「さくら」は、山中造船が誇る最新鋭のフィーダーコンテナであるので、性能の絶対評価においても優れているものと考えられる。

Power savings by Gate Rudder (at 6000 ton Displacement.)

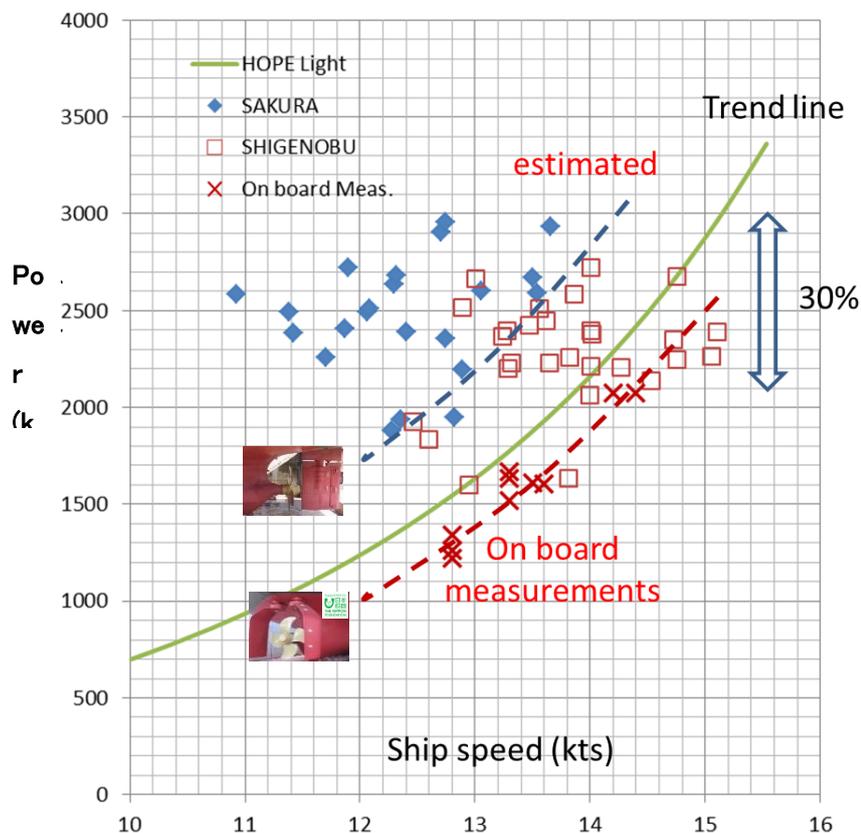


図 11-3-12 航海実績の比較 (略同一航路)

図 11-3-13 は燃費についても比較した図であるが、やはりここでも 30%近い燃料の削減が確認された。図 11-2-5 にも燃料消費量を比較したグラフがあるが、図 11-2-5 の方は、10 時間未満の入出港が中心のデータを含んでおり、ここでは、さまざまな要因で燃料消費量に変化すると考えられる。

—航海単位

FOC(ton)/Distance(mile) at 12.5 kts

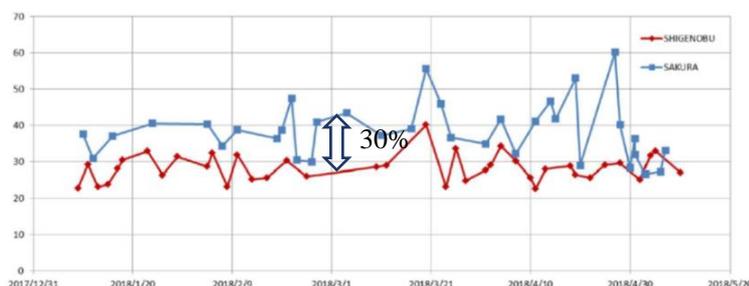


図 11-3-13 両船のトンマイルの比較 (1月-4月)

11.4 軸馬力計の取り付けと馬力計による計測

「しげのぶ」では軸馬力計搭載を本船の計画が完了した後で決まったため、すでに決まっていた軸系レイアウトの中で設置可能な軸馬力計を検討した。その結果、湘洋エンジニアリングの軸馬力計を選定し、図 11-4-1 に示された非常に短い中間軸周囲に軸馬力計を設置する計画とした。軸トルク検出部の設置予想を図 11-4-2 に示す。

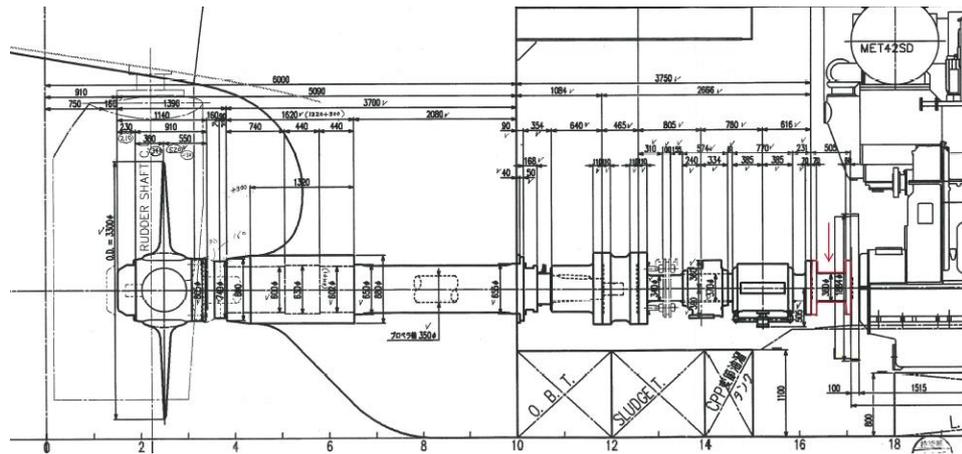


図 11-4-1 軸馬力計設置場所

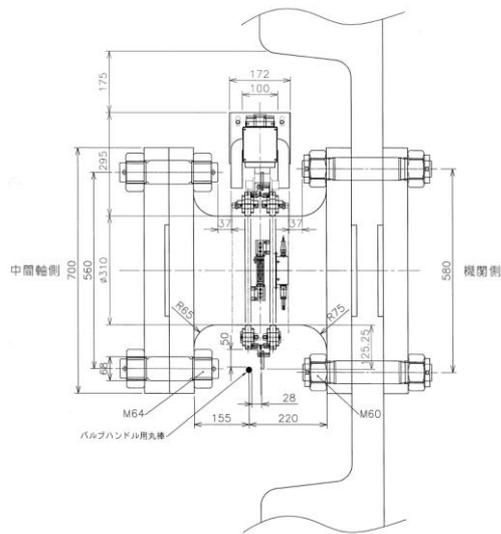


図 11-4-2 軸馬力計設置場所（検出部）

設置場所の周囲には配管やフライホイールなどがコンパクトに配置されているため、軸馬力計設置の前に、数度にわたり現場の見取を行い、最終的には現場で強度、計測精度の面で問題がない位置に軸馬力計の支持台を設置した。最終的な支持台の写真を下記に示す。支持台に取り付けられた軸トルク検出部と結線の様子を図 11-4-3 に示す。



完成 船尾側より

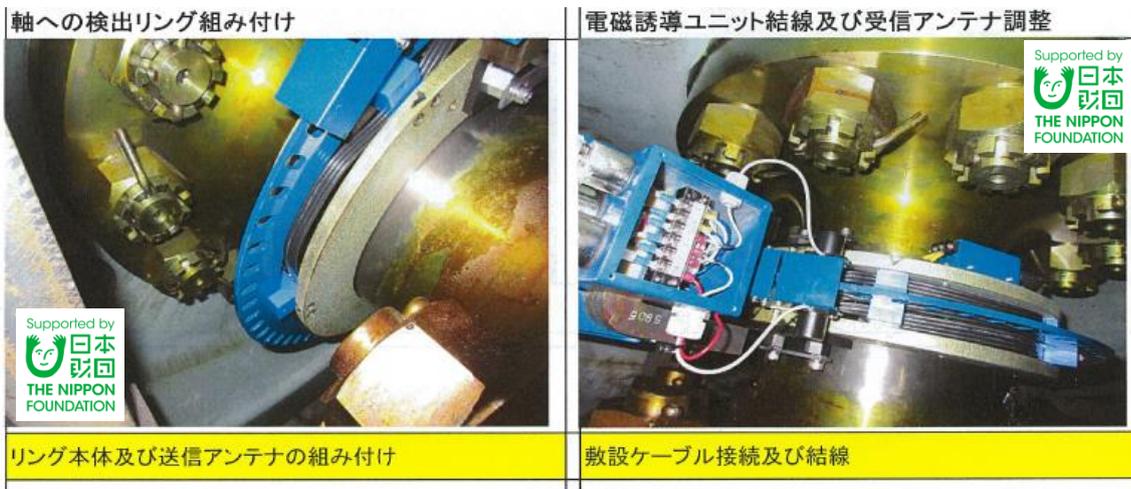


図 11-4-3 軸馬力計設置の様子

図 11-4-4 に、設置した軸馬力計と主機関モニター値の軸馬力の比較を行った結果を示す。軸馬力計が 2~3% 小さい値となったが、基本的に両者は良く一致しており、本計測結果は海上試運転で得られた本船の省エネ性能の信頼度を高めるものである。今後、同型船「さくら」にも軸馬力計を取り付け、主機関モニター値と軸馬力の一致度を確認したい。

ここで、馬力計が 2~3% 低い値を示してはいるが、主機の燃費率は、両船とも陸上運転よりやや高めを示しているため、この数値を正として、ゲートラダーの性能が、さらに 2~3% 高いと結論付けるのは早計と思われる。

すなわち、計測された馬力は、速力との関係で速力馬力曲線に反映されると同時に主機の燃費率にも影響し、計測された燃料消費量を修正しない限り、ゲートラダーの性能の向上 2~3% は、主機燃費率の 2~3% の悪化になるため、その判断は慎重にしなければならない。

これは、「さくら」についても同様なことが言える。燃料消費量が正確に計測されているならば、経済性から見た場合、馬力そのものはあまり意味が無く、船速と燃料消費量がすべてであり、30% の燃料削減が得られた今、それをゲートラダーの効果とするか、主機性能が

偶然に向上したとするかの違いということになる。ここでは、後者は、通常は考えられないため、ゲートラダーの性能がさらに2~3%高く、30%を超える省エネ効果があったと結論づけるのではなく、アブログに記録された馬力や燃料消費は、この馬力計測結果とほぼ符合しており、その精度が確認されたと考えるべきであろう。したがい、「さくら」の馬力計測は、操舵による馬力変化などの物理現象の把握に焦点が向けられることになる。

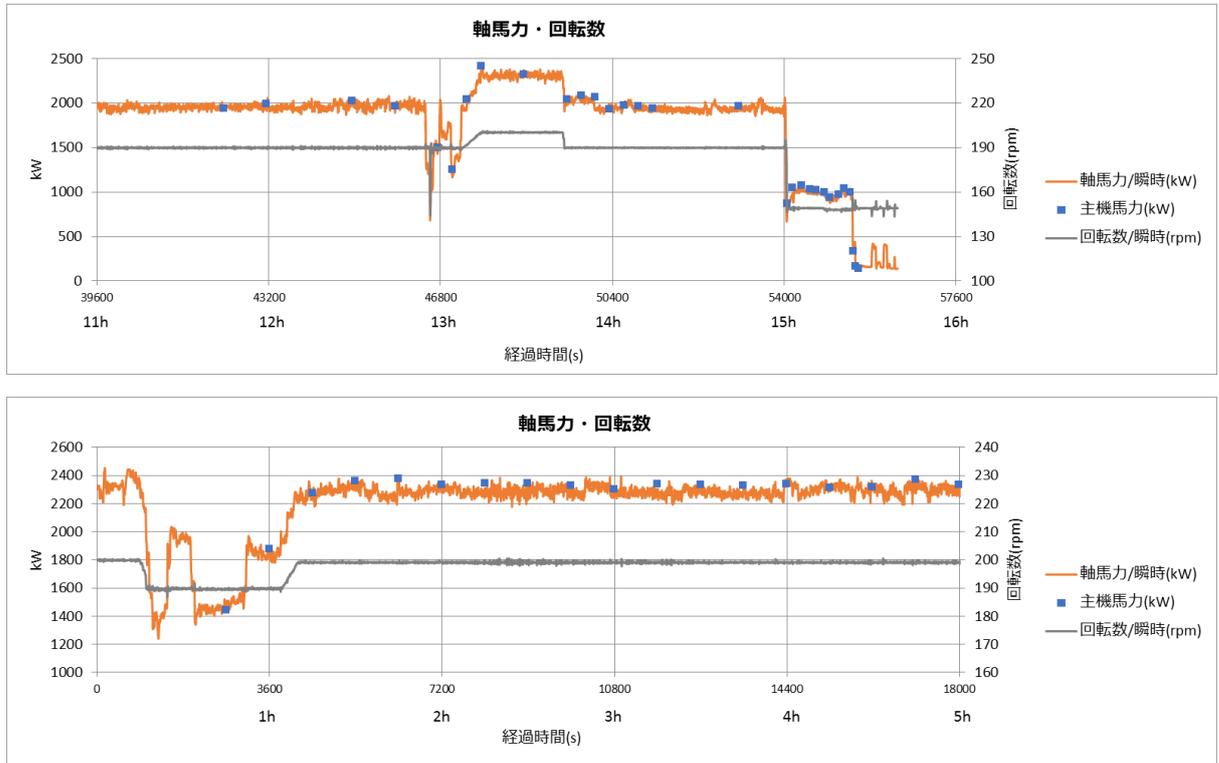


図 11-4-4 軸馬力と主機関モニター値の比較

11.5 操舵時の馬力計測

水槽試験によりゲートラダーは操舵時の抵抗が小さい事が確認されているが、実船でもその影響が現れるかを軸馬力計測により確認した。計測結果を図 11-5-1 に示す。今後、同型船「さくら」にも軸馬力計を取り付けて同様の計測を行い、可能であれば、両船の操舵時馬力変化を比較したい。

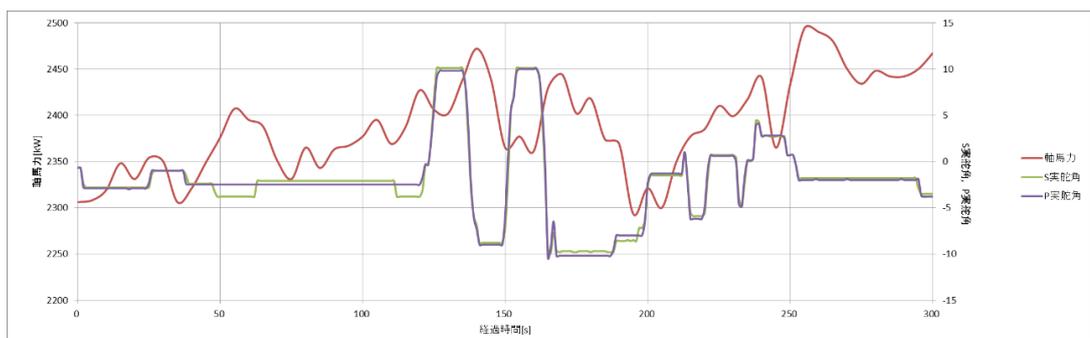


図 11-5-1 操舵による馬力変化例

図 11-5-1 では、舵角を約±10 度取ると、やや遅れて馬力も 2475kW から 2370kW まで変化しているように見える。また、次の操舵では 2450kW から 2310kW に変化しているように見える。大きなうねりの中にあるので判断は難しいが、明らかに左舷舵になると馬力が低くなっていて、その量は右舷舵の 10 度に比べて 4~5% に達する。これを水槽実験で得られた舵抵抗の値と比較して図 11-5-2 に青い点線で示した。当初は実験誤差と考えていた左舷舵の抵抗が右舷舵より小さいという現象は、今回の実船試験でも確認されたともいえる。

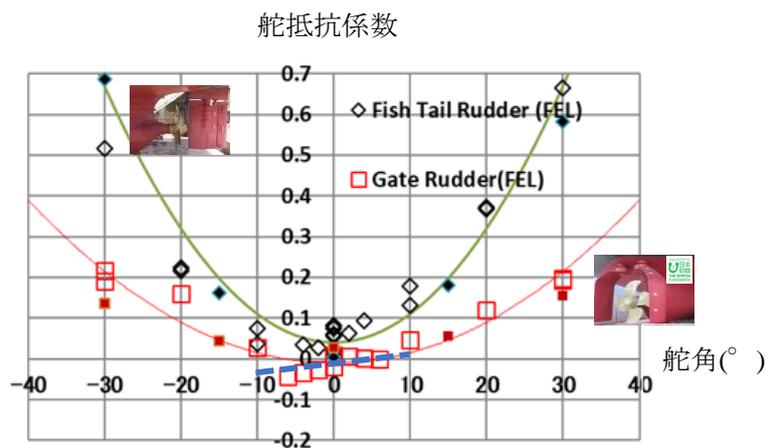


図 11-5-2 模型試験との比較（舵抵抗）

11.6 オフセット舵角の最適化

ゲートラダー両舷のオフセット舵角を変更した際の直進時の軸馬力と船速を計測する事により、推進効率に与える影響を調査した。試験予定を表 11-6-1 に、舵角の定義を図 11-6-1 に、また計測結果を図 11-6-2 に示す。オフセット舵角=-6° の時に、0° と比較して軸馬力が低減している事が確認された。

表 11-6-1 オフセット舵角変更試験スケジュール

試験No.	1		2		3		4		5	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
主機出力	3/4	←	3/4	←	3/4	←	3/4	←	3/4	←
回転数 [rpm]	200	←	200	←	200	←	200	←	200	←
翼角 [°]	21.2	←	21.2	←	21.2	←	21.2	←	21.2	←
両舷舵角 [°]	0	-2	0	-4	0	-6	0	+2	0	+4
計測時間	約5分	約5分								

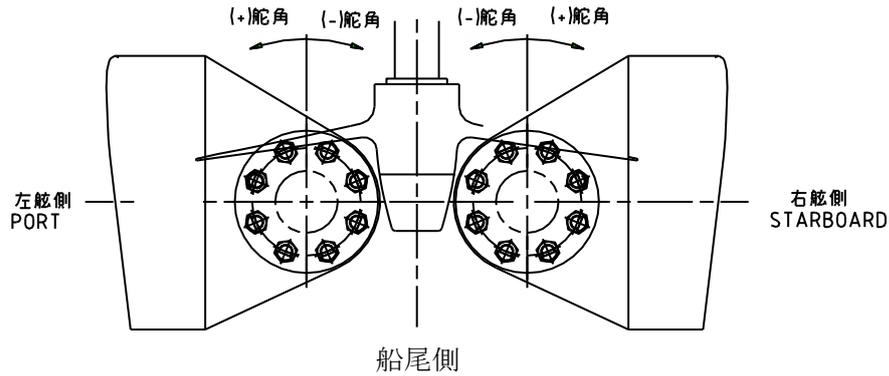


図 11-6-1 舵角の定義（舵を上から見た図）

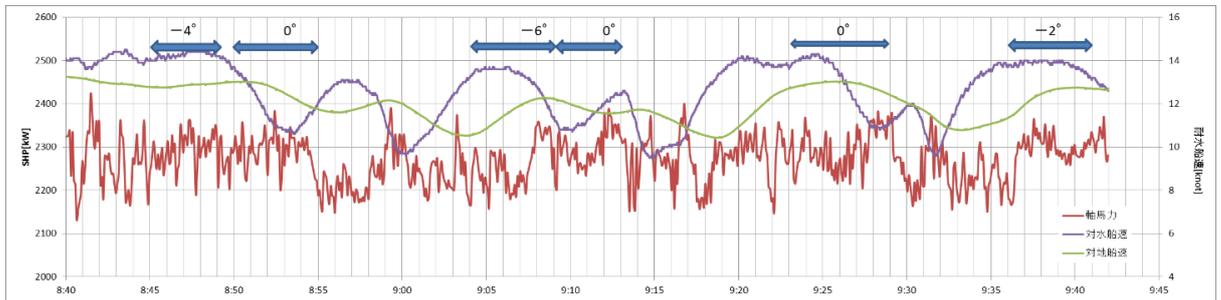
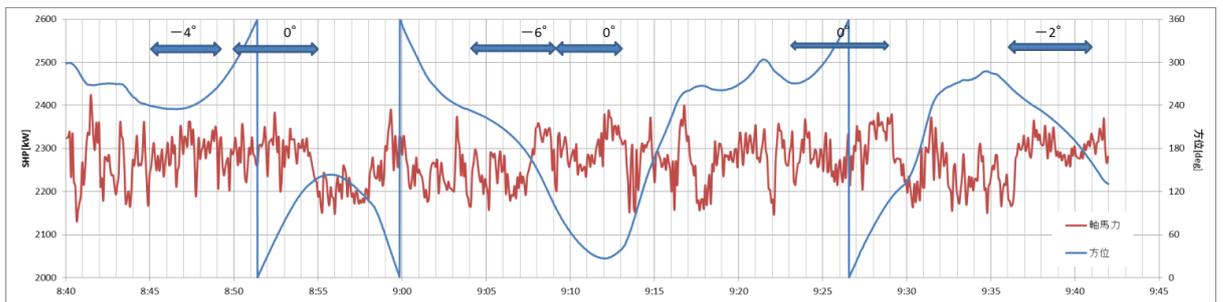


図 11-6-2 オフセット舵角と馬力の変化

11.7 制御装置のチューニング

本船のオートパイロットの基本性能に関して報告する。本船に搭載されているオートパイロットはPID¹⁰制御方式でヒューマンチューニングによる自動操船となる。前回は試運転時の結果を報告したので今回は実運航時の結果を報告する。別の項で八戸付近の東北航路の報告があったので、もう1つの代表的な航路である東京から大阪間の結果を報告する。

オートパイロットの基本的機能は保針と変針であるので、それらを確認する。確認方法は船首方位の過度なヨーイング（方位が振れている状態）や、設定方位からの逸脱、変針時の過度なオーバーシュートを確認する。舵においてはヨーイングや過度な舵角量など、異常な操

¹⁰制御演算にPID (Proportional (比例) + Integral (積分) + Derivative (微分) 方式を用いた自動操船で、制御定数の値に関して通常は公式運転時にメーカーが設定し、運航中は乗組員が船の動きを見ながら調整部で補正しながら使用する。

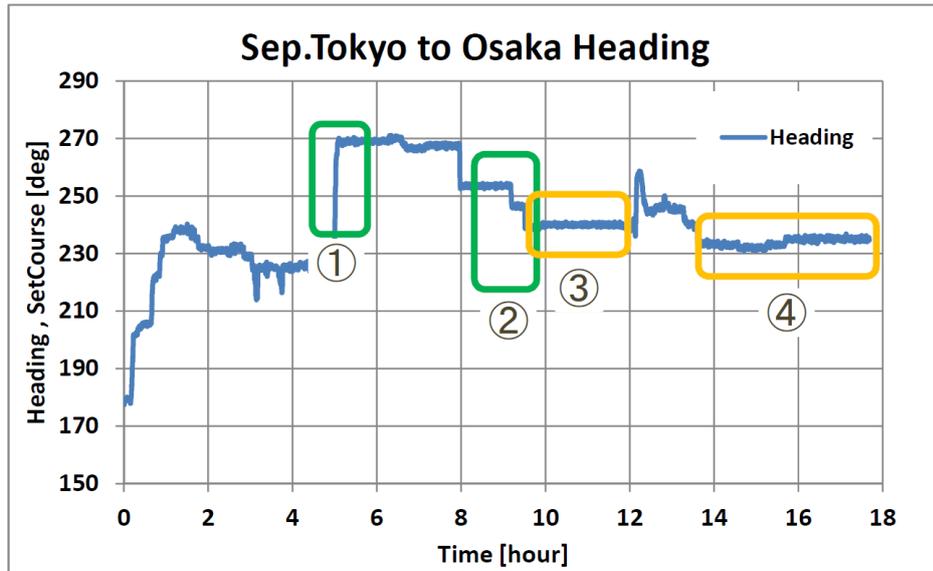
舵をしていないか確認する。

11.7.1 東京から大阪への結果 (2018/09/09)

図 11-7-1-1 は東京から大阪間における実際の航路となる。この航海から変針や保針について正常に動作をしているか確認する(図 11-7-1-2)。海域①と海域②は変針性能を、海域③と海域④は保針性能と小角度の変針を確認する。海域①と海域②の結果は図 11-7-1-3、海域③と海域④の結果は図 11-7-1-4 に載せる。図 11-7-1-3 を確認すると、過度なオーバーシュートや舵角の異常が確認されないので問題なく変針していると言える。図 11-7-1-4 を確認すると、設定方位に対し船首方位が過度なヨーイングや逸脱、オーバーシュートが無く追従し、舵角の異常も確認されないので問題ないと考えられる。



図 11-7-1-1 東京から大阪への航路と検証区間 (2018/09/09)



 : AutoPilot "KEEP" check area

 : AutoPilot "CHANGE" check area

図 11-7-1-2 方位から見た東京から大阪への検証区間 (2018/09/09)

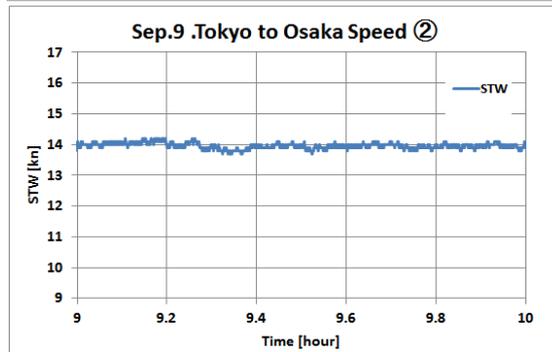
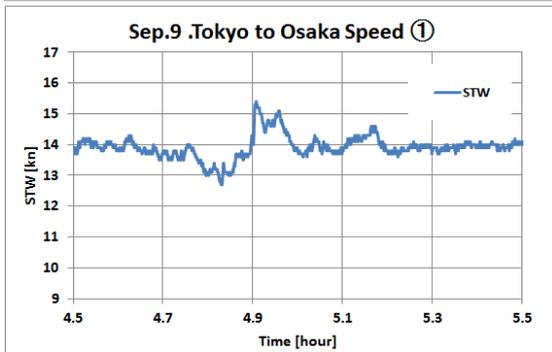
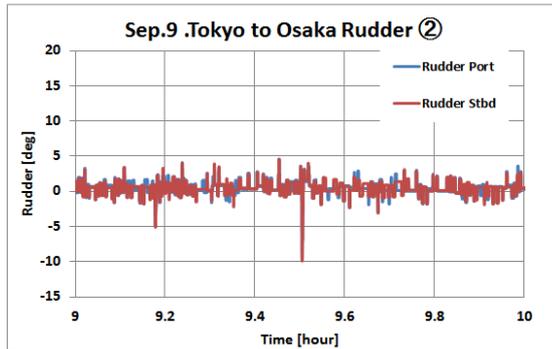
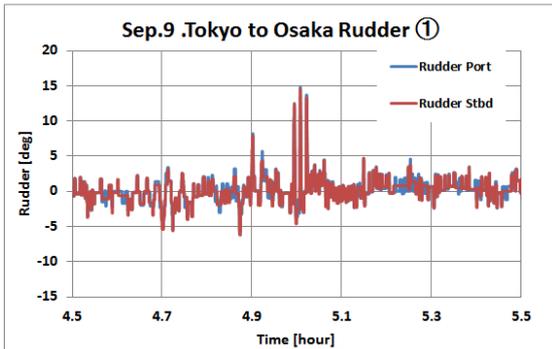
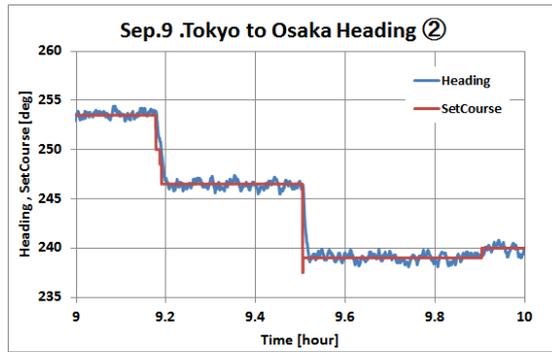
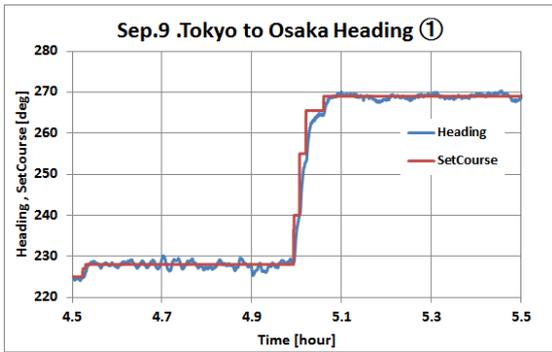


図 11-7-1-3 変針性能確認 (東京から大阪間)

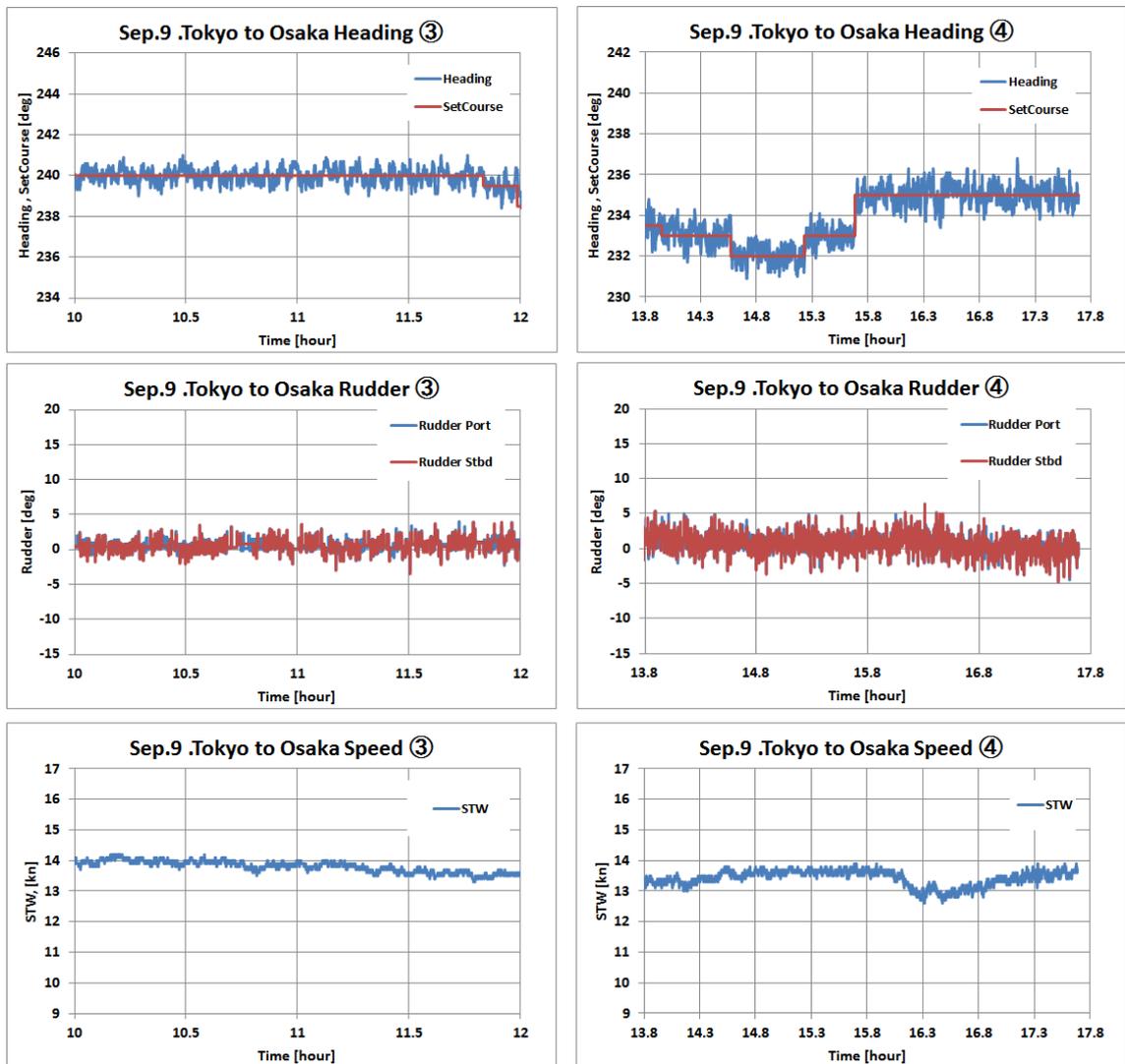


図 11-7-1-4 保針と小角度変針の性能確認（東京から大阪間）

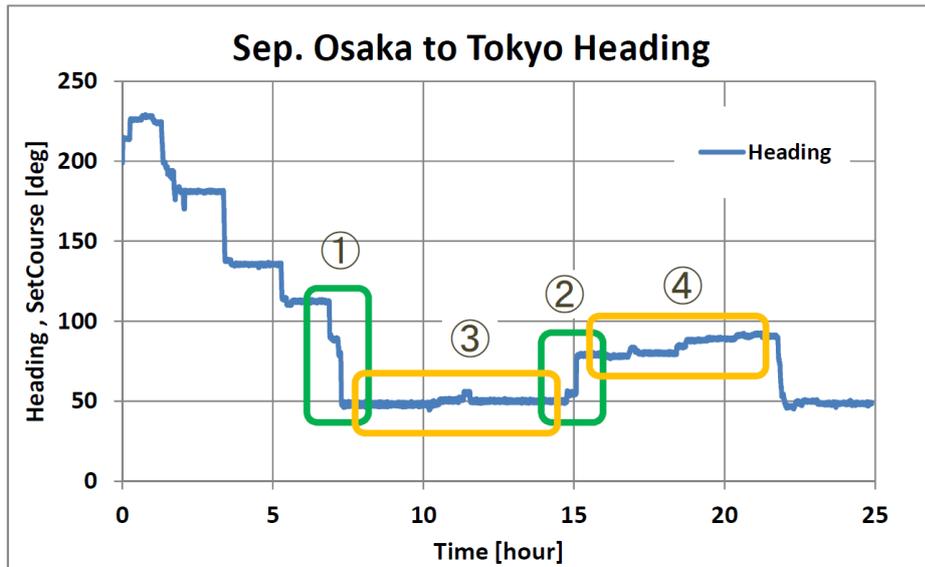
11.7.2 大阪から東京への結果 (2018/09/14)

図 11-7-2-1 は大阪から東京間における実際の航路となる。また、図 11-7-2-2 は同区間における針路の時系列を示すグラフである。東京から大阪の結果と同様に、海域①、海域②は変針性能を、海域③と海域④は保針性能を確認する。海域①、海域②の結果は図 11-7-2-3 に、海域③、海域④の結果は図 11-7-2-4 に載せる。図 11-7-2-3 を確認すると、過度なオーバーシュートや舵角の異常が確認されないので問題なく変針していると言える。図 11-7-2-4 を確認すると、海象が荒れた状況と考えられるが設定方位に対し船首方位が過度なヨーイングや逸脱、オーバーシュートが無く追従している。舵角に関しては、海象が荒れているため多少、舵角量が多いが異常でないので問題ないと考えられる。

2018/09/14 の気象情報は図 11-7-2-5 となる。海域①は潮岬近辺であることが方位の変化からも見て取れる。海域③の試験開始時が日本標準時で 4 時頃となるので、北東の風が約 5m/s 吹いていた事となる。この風速は“やや強い風”に区分されており沖だと更に風速が強くなると考えられることから“強い風”と考えれば、海象は比較的、時化していると考えられる。



図 11-7-2-1 大阪から大阪への航路と検証区間 (2018/09/14)



 : AutoPilot "KEEP" check area

 : AutoPilot "CHANGE" check area

図 11-7-2-2 方位から見た大阪から東京への検証区間 (2018/09/14)

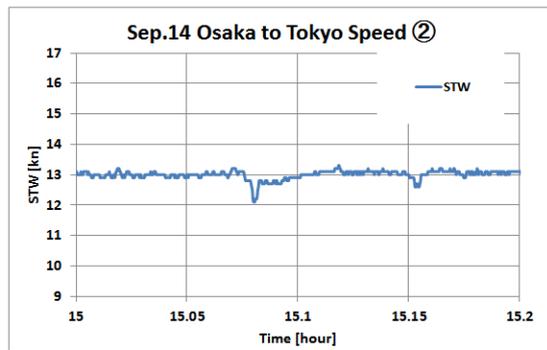
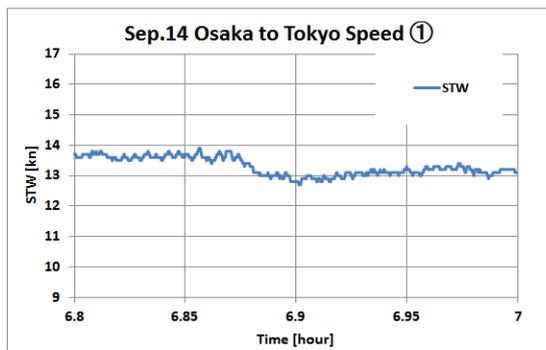
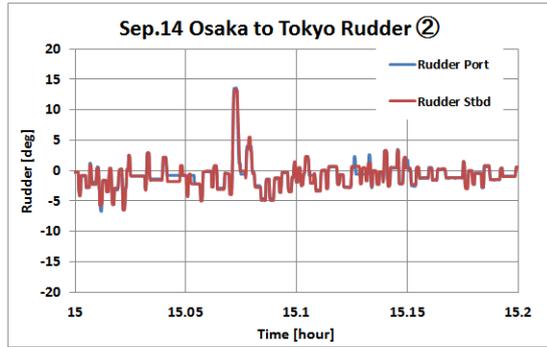
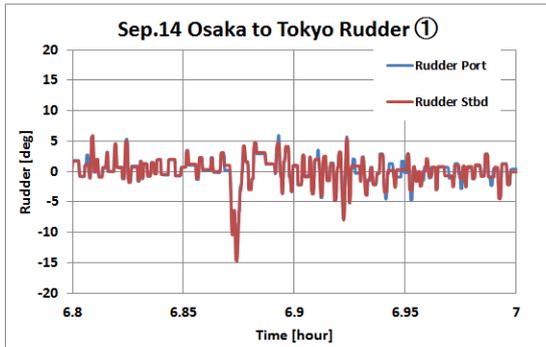
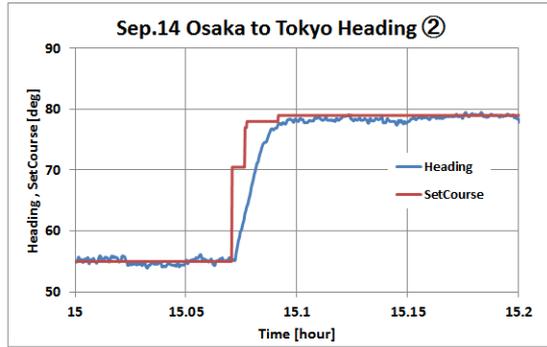
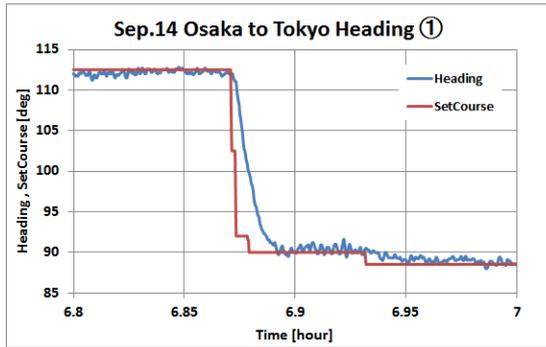


図 11-7-2-3 変針性能確認 (大阪から東京 間)

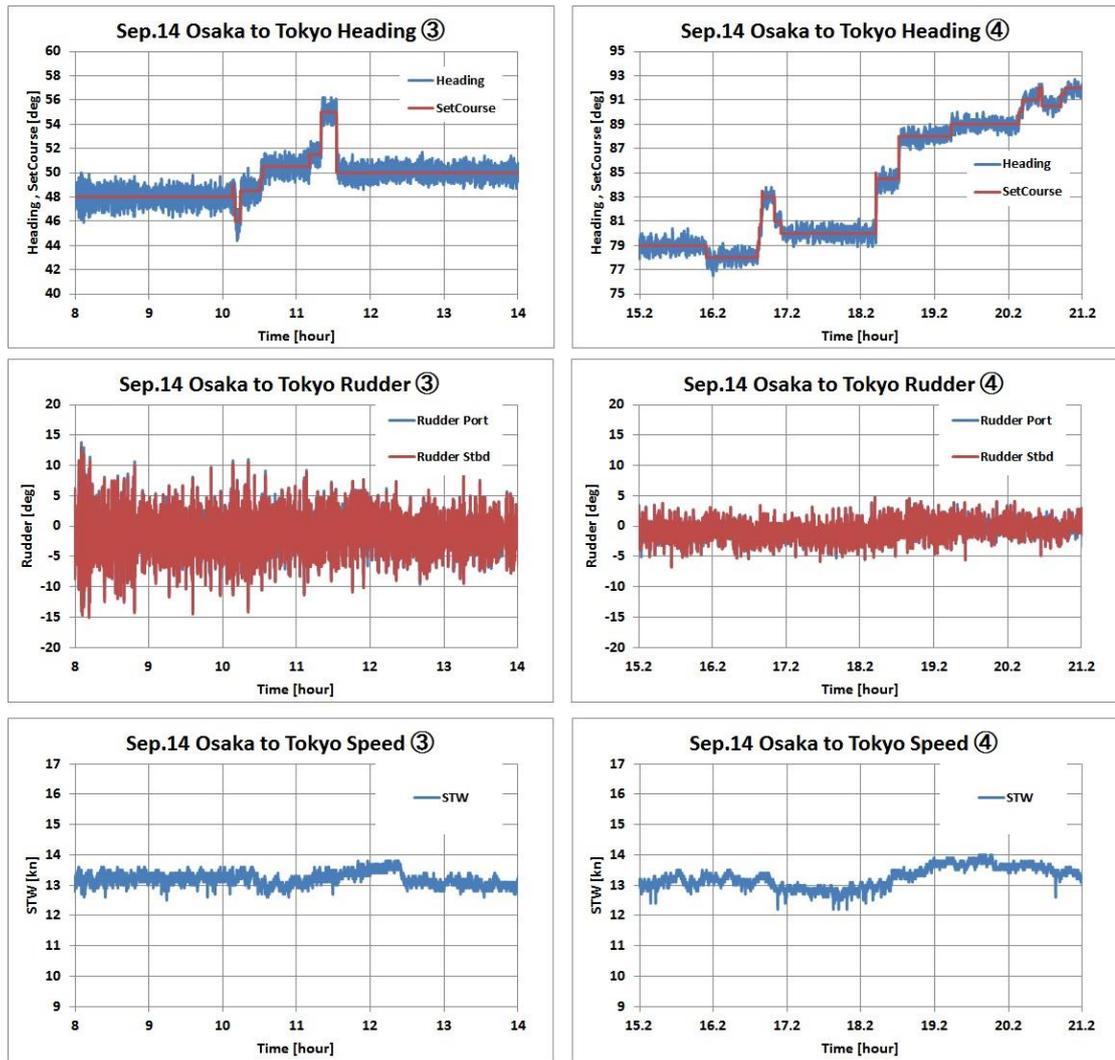


図 11-7-2-4 保針と小角度変針の性能確認（大阪から東京 間）

なお、図 11-7-2-4 は海象が荒れている状況で舵が大きく振れる場合があるがオートパイロットにある天候調整機能を現場の海象に合わせて適切に調整することで、舵の振れを少なくすることが出来る。

潮岬 2018年9月14日 (1時間ごとの値)

時	気圧(hPa)		降水量 (mm)	気温 (°C)	露点 温度 (°C)	蒸気圧 (hPa)	湿度 (%)	風向・風速(m/s)		日照 時間 (h)	全天 日射量 (MJ/m ²)	雪(cm)		天気	雲量	視程 (km)
	現地	海面						風速	風向			降雪	積雪			
1	1008.7	1016.7	5.0	23.1	22.8	27.7	98	6.1	東					●		8.28
2	1008.3	1016.3	0.0	23.1	22.8	27.7	98	5.4	東北東					●		12.5
3	1008.1	1016.1	0.5	23.0	22.8	27.8	99	4.8	東北東					●		5.62
4	1007.5	1015.5	4.0	22.7	22.7	27.6	100	4.9	北東					●		6.19
5	1008.0	1016.0	1.0	22.8	22.5	27.2	98	4.8	北東					●		12.1
6	1007.9	1015.9	0.0	22.5	22.2	26.7	98	6.0	北東	0.0				●		14.9
7	1007.8	1015.8	0.0	22.7	22.2	26.8	97	6.5	北東	0.0				◎		16.2
8	1008.2	1016.2	--	22.9	22.1	26.5	95	7.2	北東	0.0				◎		20.0
9	1008.4	1016.4	--	23.2	21.7	25.9	91	7.4	北東	0.0				◎		20.0
10	1008.4	1016.4	--	24.4	21.5	25.7	84	7.6	北東	0.0				◎		20.0
11	1008.6	1016.6	--	24.1	21.0	24.9	83	7.6	北東	0.0				◎		20.0
12	1007.8	1015.7	--	25.2	21.5	25.7	80	7.2	北東	0.4				◎		20.0
13	1007.9	1015.8	--	25.5	21.4	25.5	78	7.8	北東	0.9				⊕		20.0
14	1007.7	1015.6	--	24.8	21.3	25.4	81	7.0	北東	0.0				◎		20.0
15	1007.5	1015.4	--	24.6	21.1	25.1	81	7.2	北東	0.0				◎		20.0
16	1007.6	1015.6	--	24.1	21.6	25.8	86	7.0	北東	0.0				◎		20.0
17	1008.0	1016.0	--	23.2	21.8	26.2	92	6.4	北東	0.0				◎		20.0
18	1007.8	1015.8	--	22.6	21.4	25.5	93	6.7	北東	0.0				◎		20.0
19	1008.0	1016.0	--	22.6	21.2	25.2	92	6.8	北東	0.0				◎		20.0

図 11-7-2-5 2018/09/14 潮岬の気象情報

11.7.3 微速前進（クラビング）モードの結果

離着陸性能向上を意図して計画したクラビングモードを、就航直後の離着陸時に数回試験的に使用した。しかし

- 1) 低速時のゲートラダーの舵輪操作でも容易に離着陸が可能であることが分かったこと
- 2) クラビングモードの初期状態への舵角移動に時間がかかること

から、それ以降使用されなかった。サイドスラストと組み合わせたクラビングモードの使用により、横移動に近い船体移動が実現できたものの、クラビングモードは特別に要求される場合以外、通常装備しておく必要性は示されなかった。

11.7.4 制御装置の基本性能に関するまとめ

以上の就航後の操船状況の査結果から以下のことが言える。

- 1) サービス船速（通常の運航船速）時において、実海域でのオートパイロットの基本性能に問題が無い事が確認できた。これは、サービス船速時の操舵性能に関して通常舵を装備した同型船と比較すると、ゲートラダーは通常舵に比べ性能に問題がなく、通常舵の性能と遜色ない結果である。
- 2) 低速時の通常の舵輪操作で容易に離着陸が可能であることが判り、微速前進（クラビング）モードは、通常装備する必要性は示されなかった。

11.8 操縦性能の確認

試験対象船「しげのぶ」と同型船「さくら」の両船を連続して長期に操船されたキャプテンと機関長からのヒアリング結果を表 11-8-1 に示す。

表 11-8-1 両船の操船経験があるキャプテンと機関長の代表的なコメント

(1) 操縦性の保針性能は、「さくら」に比べて極めて良い。
(2) ゲートラダーの舵利きは良いが、効きははじめが一瞬遅い。
(3) 着岸時、横風があっても、「さくら」に比べて操船しやすい、「さくら」は大変だった。
(4) ゲートラダーの通常操舵による離着岸時の操船性能は十分であり、微速前進（クラビングモード）による操船は、その必要性を感じない。
(5) 航海中、「さくら」は船尾から横風を受けると切りあがり操船が大変だったが、「しげのぶ」は切り上がりが少なく横風に強い。
(6) ゲートラダーを装備した「しげのぶ」は荒天時に横揺れに強く、揺れない。

以上のコメントの通り、現場におけるゲートラダーの評判はとても良かった。まとめると次のとおりである。

- ゲートラダー用制御装置は、従来の2枚舵装備船用オートパイロットにゲートラダー用の機能を追加したため、操縦性は「さくら」に比べて極めて良いという評価を得た。
- 航海中の保針性の良さや、クラビングモードを使用しない離着岸時の操船性の良さが重なり、ゲートラダー用制御装置の機能性については、通常舵以上との評価を得た。
- 舵輪操作を採用したこともあり、ゲートラダー用制御装置の直感性（ユーザフレンドリネス）については、通常舵と変わらず使い易いとの評価を得た。

従って、当初の目標を達成できたと判断する。

このようなコメントを頂けた理由の一つに、舵抵抗の小さなことがあげられる。舵を切っても速力が落ちず、舵利きが持続されることが上げられる。ただし、比較する「さくら」も、舵力の大きいフラップ舵を装備しているので、フラップ舵の性能が悪いわけではないと考えられ、あくまで相対的な比較である。

操縦性能について、水槽試験結果と試運転結果でチューニングされた操縦性シミュレーションプログラムを利用して比較した。図 11-8-1 及び図 11-8-2 にシミュレーションで実

施した Z 試験時の速力低下を示す。同じ初速で実施した Z 試験の速力低下の結果は、実際の航海においてもオートパイロットによる操舵による速力低下と同じ現象であり、操縦性シミュレーションの結果から航海中の速力低下が小さく、シーマージンの減少に結び付くと考えられる。参考までに、試運転の低速時の旋回試験結果を図 11-8-3 及び図 11-8-4 に示す。

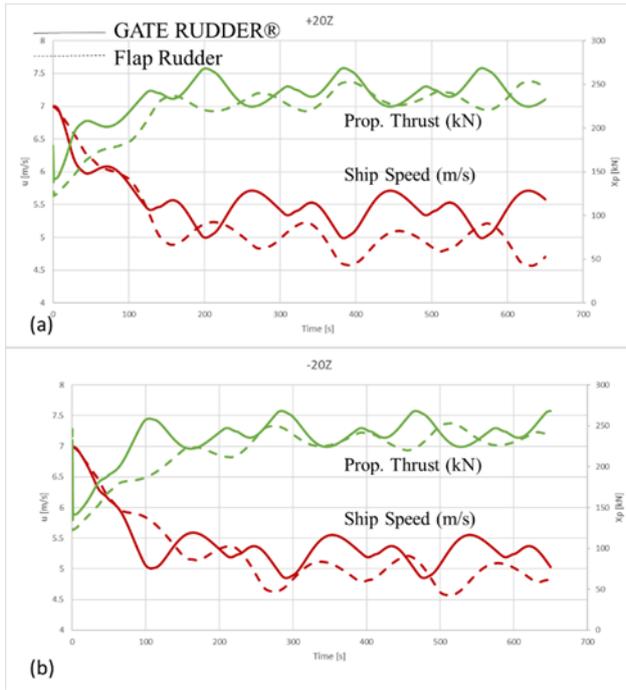


図 11-8-1 Z 試験時の速力低下比較

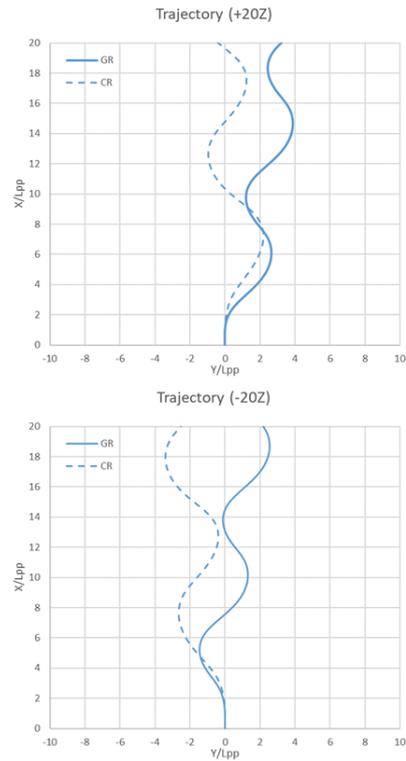


図 11-8-2 Z 試験時の航跡比較

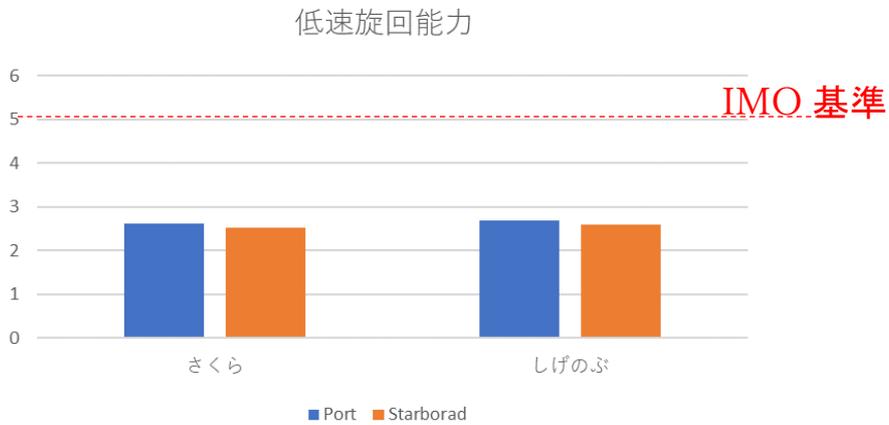


図 11-8-3 低速旋回試験時の旋回径比較 (Lpp 比)

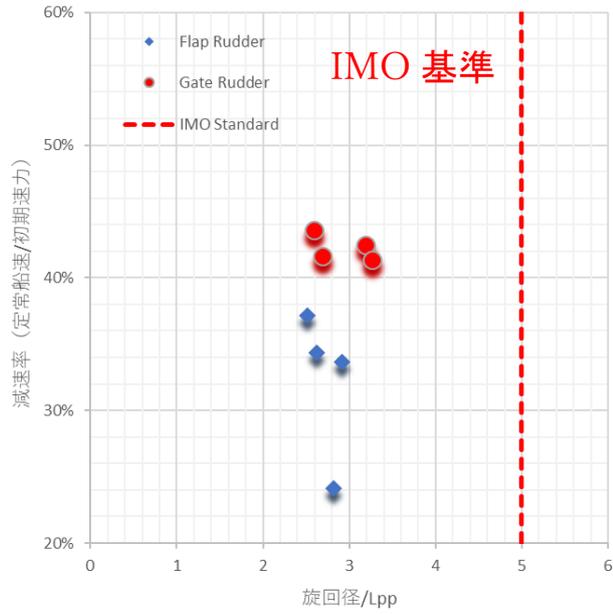


図 11-8-4 旋回試験時の速力低下比較

1 2. 目標の達成状況

本助成事業で立てた当初目標の達成状況を表 12-1 に整理した。

表中に示す同型船はフラップ舵装備船であるが、舵搭載位置から通常舵装備船として取り扱っている。また、類似船はほぼ同じクラスの大きさの通常舵装備船である。表 12-1 に示すとおり、目標は達成することができた。

また、助成事業の目標とした項目以外に達成できた事項を表 12-2 に示す。

表 12-1 助成事業目標の達成状況

目標	達成度	乖離の理由
通常舵装備船と比較して実海域における推進性能を5%改善する。	同型船と比べ、試運転(5.7.1)において14%、実航海(11.2～3)にて約30%の改善を達成した。 また類似船とも比較した結果、同程度の効果を確認した。	世界初の舵であるため水槽試験法が確立されていない、実船での効果予想が困難であった。
船内振動レベル、騒音レベルを3dB低減する。	試運転の計測結果(5.7.3)より、ゲートラダー装備船ではプロペラに起因する船体振動がほとんど無く、船内騒音は同型船と比較して3dB以上低減された。 就航後は主機負荷や喫水が変化するため比較が難しいが、喫水が試運転時よりも大きくなっており、試運転時に確認された状況は維持されていると判断した。	—
微速前進時の操縦性を通常舵より向上させる	通常舵(フラップ舵)装備船と比べても、離着岸時に優れた操縦力が得られていることが、試運転時の操縦性能試験結果(5.7.2)、及び乗組員の談話より示された。	ゲートラダーの低速時操縦性が予想より優れていて容易に離着岸が可能であることが判り、今回新たに開発した微速前進(クラビングモード)は実航海で使用されなかった。
実航海中の操作性、機能性および直観性が通常舵と同等以上にする。	キャプテンへのヒアリング結果(11.8)より、舵輪操作のみの操舵で通常舵と同等以上の機能であることが示された。	—

表 12-2 助成事業目標以外の達成項目

項目	達成度
実海域での推進関連データを収集する。	同型船、類似船も含めたアブログデータを収集することができた。また本船のオンボード計測も実施できた。
ゲートラダーの操縦性関連データを収集し、制御装置の操作性を確認する。	2 度にわたる操舵を中心とした実船試験実施し、制御装置の操作性を確認した。
ゲートラダー制御装置のチューニングと制御フローを確立する。	十分な省エネ量が達成できたので、オフセット舵角の調整は必要なしと判断した。軸馬力計の計測結果からさらに 4～5%の燃費改善が期待される。

1 3. ダクトプロペラの歴史から見たゲートラダーへの期待

ゲートラダーの最新の研究によると、ゲートラダーは舵の機能を備えたダクトプロペラの派生版ともいえる。図 13-1 は、そのダクトプロペラがどのように分化、進歩してきたかを示しているが、ダクトプロペラは、コルトノズル型、前方配置型(フロントタイプ)、そしてゲートラダーのようなオープンタイプ型の 3 タイプに分けることができる。さらに前方配置型は、大型のものから徐々に小型で振動や騒音に影響の少ないものへと変化してきた。また、オープンタイプのもはゲートラダーが最初のものではあるが、舵機能も備えていることが特徴とも言える。

図 13-2 は、フロントタイプの代表でもある Mewis Duct の開発の背景を Mewis 本人が発表した際の資料であるが、このダクトの原型が 1996 年に開発された SILD であったことも記載されている。SILD は、当時の VLCC 建造ラッシュの最中、ギリシャ船主の建造した VLCC に初めて搭載された。まだ、バンカー価格が 28 \$ であったころのフロントタイプのダクトプロペラであり、このタイプのダクトプロペラの開発の歴史は 20 年以上にもなる。

これまでの実船での実績、尺度影響を考慮した馬力推定法などを利用すると、これらの 3 つのタイプのプロペラ効率が見えてくる。

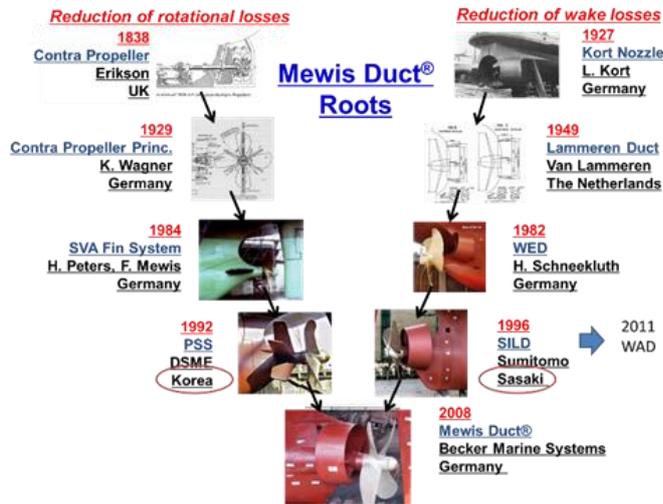


図 13-1 ダクトプロペラの種類と歴史

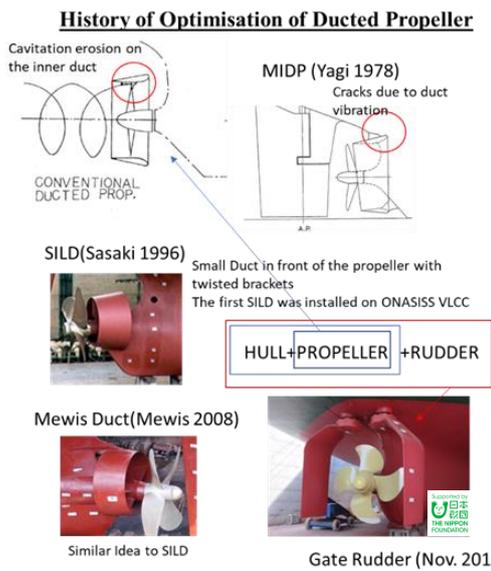


図 13-2 フロントタイプ型ダクトの歴史

図 13-3 は、模型実験で得られた推定値を含めた実績値と他の2つのタイプのプロペラ効率を示している。ただし、比較を容易にするため、ダクトをプロペラに含め、自航要素が変わらないとしてプロペラ効率に反映しているため、実際には推進効率の意味合いが大きいことを述べておく。

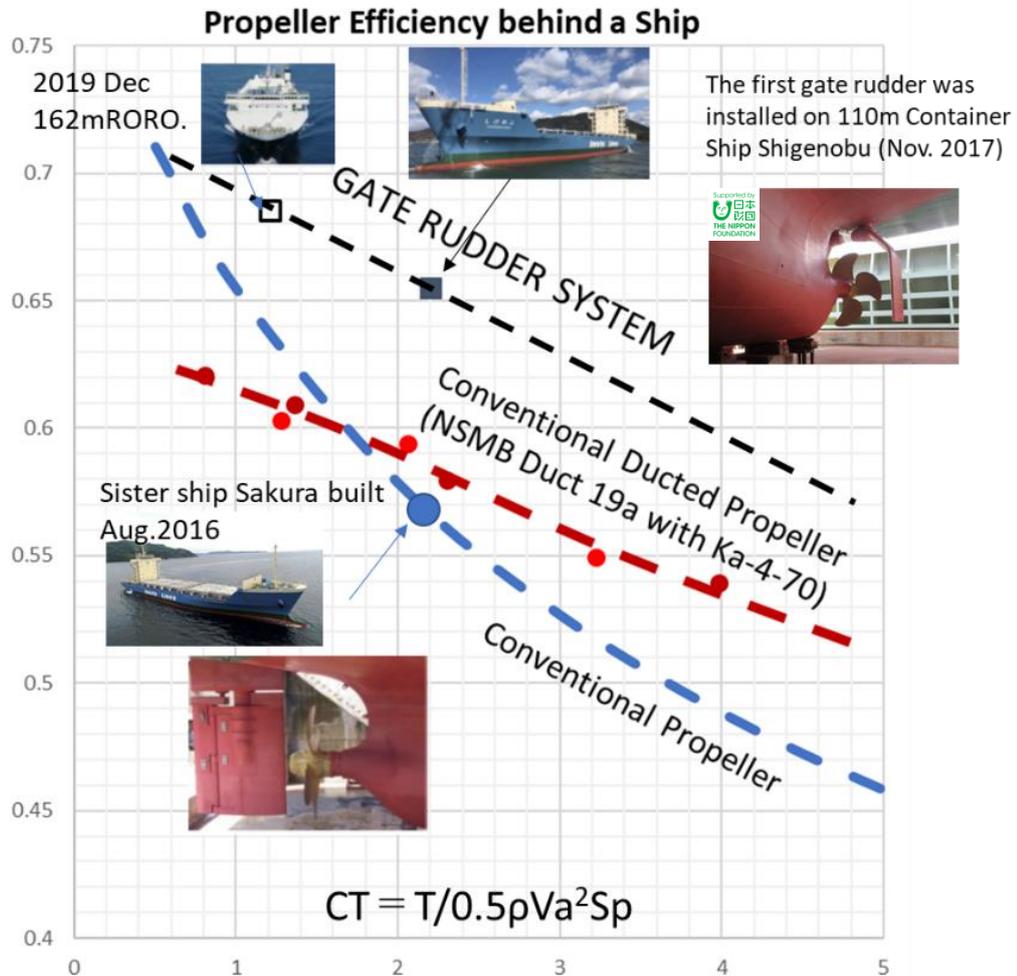


図 13-3 ゲートラダー のプロペラ効率

この図から、ダクトプロペラの 카테고리としてオープンタイプ型、フロントタイプ型、そしてコルトノズル型の順番でプロペラ効率が高くなると予想され、例えば本船のプロペラの荷重度を表すスラスト係数 2.1 では、ダクトプロペラは高々2%程度しか期待できないが、オープンタイプのゲートラダーでは 14%の結果が得られている。しかしながら、荷重度が非常に小さい RoRo 船などでは、ダクトプロペラと同様な傾向で、その効果も 8%程度に減少した。そのほかの 499 型貨物船などの試験結果を反映すると、オープンタイプダクトの省エネ量が予測でき、これを既存船の推進データを利用すると、それぞれの船ごとの省エネ量が把握できる。

例えば、ここ 20 年で建造された内航タンカーを調査すると、それらをゲートラダーにレトロフィットした場合、就航後のシーマージンの低減の 5~10%も考慮すると、「しげのぶ」で得られた約 30%の燃料削減効果と同等の 20~30%の省エネ量が期待できる。

1 4. 今後の予定

すでに3隻のゲートラダー装備計画について引合いを頂いており、今後は、ゲートラダーの製品化をすすめるため、軽量化を中心としたコストダウンを実施し、早期にマーケットへ投入できる体制を整える。

1 5. まとめ

平成29年度にコンテナ船用ゲートラダーを設計し、実船に搭載して海上試運転を実施した。海上試運転の結果から、

- 1) ゲートラダーを使用した省エネ推進システムの推進性能、操縦性能が期待以上であり、
- 2) 特に省エネ性能は14%と非常に大きい値であった

ことが示された。

本年度は、試運転で得られた省エネ性能が、そのまま実海域でも継続的に発揮できるものかどうか、就航実績のモニタリングと実船試験を主体に調査した。その結果、

- 3) 馬力情報（アドミラルティ係数）からみても燃費情報（トンマイル）から見ても30%に近い削減量が得られ、
- 4) その内容は平水における14%の性能差に加え、約15%がシーマージンの差として表れている

ことが分かった。ゲートラダーは、

5) 特殊舵に比べても見劣りがしない優れた操縦力を示すが、そのような特殊舵は総じて燃費性能についてはどちらかと言えば悪化する傾向にあった。一方、ゲートラダーは舵抵抗を推力に変換することで、大きく燃費を改善できることが分かった。

10ヶ月のモニタリング期間を通して30%近い省エネ量が確認されたことについてさまざまな視点から解析を加えたところ、

- 6) これまであまり注目されていなかった舵抵抗の尺度影響が水槽試験結果に影響していることや、
- 7) ゲートラダーの持つダクト効果が尺度影響によって模型船では非常に小さいが、実船では予想外に大きいこと

が判明しつつある。

さらに大きな視点に立てば、通常舵の場合のプロペラの推力は船体抵抗よりも20~30%多く必要という事実が、当然のように受け入れられてきたことがある。この20~30%はプロペラの推力がごく近傍の船体の圧力低下を起こして、船を吸い込んでしまう（正確には推力減少率と呼ばれる）現象が生じるが、プロペラ推力をプロペラの外側にあるゲートラダーが分担させると、その分の推力は遠くにある船体を吸い込むことはほとんど無いので、推力減少率が大きく改善されることになる。

昨今、いくつかの省エネ技術を複合的に利用して、その効果を大きくしようとするものもあるが、本事業ではゲートラダーのみで30%近い省エネ量が得られたので、今後、適用船種の

拡大や大型船用ゲートラダーの開発などを通して、新たな省エネシステムとして船舶から排出される温室効果ガスの削減に貢献したい。

「この報告書は BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました」

(一社)日本舶用工業会

〒105-0001

東京都港区虎ノ門一丁目13番3号(虎ノ門東洋共同ビル)

電話：03-3502-2041 FAX:03-3591-2206

<http://www.jsmea.or.jp>