次世代型帆装船の帆の角度制御に関する研究

鈴木 良介*、塚田 吉昭*、上野 道雄*

A Study on Sail Control for Advanced Sail-assisted Ships

by

Ryosuke SUZUKI, Yoshiaki TSUKADA, and Michio UENO

Abstract

Because of the introduction of regulations on Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new-built ships, it is required to reduce fuel consumption in the navigations. Since sail-assisted ships are one of the effective proposal to reduce them, these kinds of ships are gathering attention again in these days. Sails are needed to generate propulsion as much as possible in order to maximize the performance of sail-assisted ships. Therefore, not only form or structure of sails, which have been already researched¹⁾²⁾ sufficiently, but also the other issues should be improved for the realizations of them. One of the other problems is that lifts generated by each sails of plural sails on the ship deck become smaller than those by sole sail without obstacles because of interferences from the other sails and a ship hull. However, there are only a few researches³⁾ regarding them.

The way to control sails of advanced sail-assisted ships⁴⁾ for the reduction of those interferences are studied in this paper. First paragraph is summarized about wind tunnel tests. Coefficients of wind forces and moments which are generated by each sails on the model ships and include the interferences are measured by the test. New methods to control attack angle of each sails are proposed from the test results. Second paragraph is summarized about numerical simulations to evaluate quantitatively the difference of wind characteristics by each sail-control methods. Steady ship speed in the wind is calculated by the simulation of steady equilibrium condition model and wind tunnel test results. As the results, authors revealed that lager propulsion can be generated by new sail control methods than that by previously proposed one³⁾.

 ^{*} 流体性能評価系
 原稿受付 平成 26 年 7 月 4 日
 審 査 日 平成 26 年 11 月 29 日

目 次

1.	ま	えが	き・・・・	• • • • •	• • • •	• • • •	•••	• • • •	•••	••	$\cdots 3$
2.	干衫	步影	響を考	慮した	ミ帆の	り流住	本力	特性	•••	•••	•••3
	2.1	風ĩ	『実験・	• • • • •	• • • •	••••	•••	• • • •	•••	•••	· • • 4
	2	.1.1	風洞模	型・・	• • • •	••••	•••	••••	•••	•••	•••4
	2	.1.2	実験の	方法		••••	•••	• • • •	•••	•••	· • • 4
	2	.1.3	実験状	態・・	• • • •	••••	•••	••••	•••	•••	$\cdots 5$
	2	.1.4	帆の角	度制	御方	法・・	•••	••••	•••	•••	$\cdots 5$
	2	.1.5	実験結	果の	評価	の方	法・	• • • •	•••	•••	$\cdots 7$
	2.2	実験	緑結果・	• • • • •	• • • •	••••	• • • •	•••	•••	•••	$\cdot \cdot 7$
	2.3	各邨	しにはた	らく	流体	力に	関す	「るぇ	夸察	•••	•11
3.	定	常帆	走性能	• • • • •	• • • •	• • • •	•••	• • • •	•••	•••	·12
	3.1	船体	に働く	風圧	係数	の推	定・	• • • •	•••	•••	·12
	3.2	計算	E モデル		• • • •	• • • •	•••	• • • •	•••	•••	·13
	3	.2.1	支配方	程式	と計	算法	• • •	••••	•••	•••	•13
	3	.2.2	支配方	程式	の各	項・・	•••	• • • •	•••	•••	•14
	3.3	対象	き船・・・	• • • • •	• • • •	• • • •	•••	••••	•••	•••	·15
	3.4	計算	〔条件・	• • • • •	• • • •	••••	•••	••••	•••	•••	·15
	3.5	解析	「結果・	• • • • •	• • • •	••••	•••	••••	•••	•••	·15
4.	結		•••••	• • • • •	• • • •	• • • •	•••	• • • •	•••	•••	·16
謝	·辞・	••••	••••	••••	••••	• • • •	••••	•••	•••	•••	$\cdot 17$
参	考文	て献・	••••	••••	••••	• • • •	••••	•••	•••	•••	·17
付	・録・	• • • •	••••	• • • • •	• • • •	• • • •	•••	••••	•••	•••	•22

記号

(第2章) *Re*: レイノルズ数[-] F_n :フルード数[-] *LoA*:船の全長[m] *L*_{PP}: 船の垂線間長[m] B:船幅[m] D:船の片深さ[m] dFull: 満載時喫水[m] ATFull:満載時水線上部の前後方向投影面積[m²] ALFull:満載時水線上部の横方向投影面積[m²] γs :スラット角[deg] γ_B :ブーム角[deg] S_{sail} :三角形複合帆投影面積[m²] AR: 三角形複合帆アスペクト比[-] *C*: 三角形複合帆コード長[m] U_A : 対地風速[m/s] a : 迎角(上添え字は帆の番号)[deg] ρ_A : 空気密度[kg/m³] CL:各帆の揚力係数(上添え字は帆の番号)[-] C_D:各帆の抵抗係数(上添え字は帆の番号)[-] CM: 各帆の旋回軸周りモーメント係数(上添え字

は帆の番号)[-]

- Cxsail:各帆の推進力係数(船体前後方向の力の無 次元係数)(上添え字は帆の番号)[-]
- Cysail:各帆の横力係数(船体左右方向の力の無次 元係数)(上添え字は帆の番号)[-]
- Cnsail:各帆の船体中央周りモーメント係数(上添 え字は帆の番号)[-]
- C_{xsail} : 帆の推進力係数の平均値[-]
- C_{vsail} : 帆の横力係数の平均値[-]
- C_{nsail} :帆の旋回軸周りモーメント係数[-]

(第3章)

- *C_{Xhull}*: 帆のない船体に働く推進力係数[-]
- *C*_{Yhull}: 帆のない船体に働く横力係数[-]
- CNhull : 帆のない船体に働く船体中央周りのモー メント係数[-]
- *X_{hull}* : 帆のない船体に働く推進力[N]
- Yhull : 帆のない船体に働く横力[N]
- *N*_{hull}: 帆のない船体に働く船体中央周りのモー メント[N・m]
- AT:満載時水線上部の前後方向投影面積[m²]
- AL:満載時水線上部の横方向投影面積[m²]
- CXship : 帆を有する船体に働く推進力係数[-]
- *Cyship* : 帆を有する船体に働く横力係数[-]
- C_{Nship}: 帆を有する船体に働く船体中央周りのモ ーメント係数[-]
- V : 船速[m/s]
- β :斜航角[deg]
- δ : 舵角[deg]
- R_{still}:平水中抵抗[N]
- XD : 斜航により水面下船体に働く前後力[N]
- YD: 斜航により水面下船体に働く左右力[N]
- N_D:斜航により水面下船体に働く船体中央回り
 回頭モーメント[N・m]
- XR : 舵による船体に働く前後方向成分[N]
- YR: 舵による船体に働く左右方向成分[N]
- N_R: 舵による船体に働く船体中央回り回頭モー メント[N・m]
- X_A:風により水面上部の船体に働く前後力[N]
- YA: 風により水面上部の船体に働く左右力 [N]
- N_A:風により水面上部の船体に働く船体中央周りの回頭モーメント[N・m]
- *Rw* : 波浪中抵抗增加[N]
- Yw :波による定常左右力[N]
- N_W:波による船体中央周りの定常回頭モーメン ト[N・m]

 Q_P : $\mathcal{T} \square \mathcal{C} \neg \vdash \mathcal{N} \land \mathbf{m}$] P:馬力[kW] N_P:プロペラ回転数[RPM] *U*_{AA}:見かけの風速[m/s] H_W :波高[m] T_W :平均波周期[s] *θw*:波向き(船首方位基準、反時計回り正)[deg] *d_{mid}*:船体中央喫水[m] ρ :海水密度[kg/m³] *D*_P:プロペラ直径[m] *K*_T:スラスト係数[-] *K*₀:トルク係数[-] J:前進定数[-] 1-w:伴流係数[-] 1-t: 推力減少係数[-] 1-tr : 操舵抵抗减少係数[-] 1-wR0: : 舵位置での直進時伴流係数[-] *nR*:プロペラ効率比[-] ŋt: : 伝達効率[-] aH : 舵力增加係数 *XR*: 船体重心と舵軸中心間距離[m] *x*_H:船体重心と舵力増分作用位置間距離[m] $F_{N'}$:無次元舵直圧力[-] A_R : 舵投影面積[m²] *C*_{RUD}: プロペラ後流の修正係数[-] H_R : 舵高さ[m] $P: \mathcal{T} \cap \mathcal{C} \cap \mathcal{F}[\mathbf{m}]$ ar : 舵有効流入角[deg] *VE* : 整流係数[-] CKQ0:トルク係数を前進定数の関数の多項式と して表した場合の定数[-] CKQ1:トルク係数を前進定数の関数の多項式と

- して表した場合の前進定数に比例する 項の係数[-]
- CKQ2 : トルク係数を前進定数の関数の多項式として表した場合の前進定数の 2 乗に比例する項の係数[-]
- Ct1: 全抵抗係数を速度の関数の多項式として表した場合の速度に比例する項の係数[-]
- Ct2 : 全抵抗係数を速度の関数の多項式として表した場合の速度の 2 乗に比例する項の係数[-]
- Ct3:全抵抗係数を速度の関数の多項式として表した場合の速度の3乗に比例する項の係数[-]
- *C*_{KT0}:スラスト係数を前進定数の関数の多項式 として表した場合の定数[·]
- CKT1: スラスト係数を前進定数の関数の多項式 として表した場合の前進定数に比例す る項の係数[-]

CKT2 : スラスト係数を前進定数の関数の多項式 として表した場合の前進定数の 2 乗に 比例する項の係数[-]

1. まえがき

1973 年のオイルショックおよびそれに伴う船 舶燃料費の上昇により、1980年代には燃料費削 減のための帆装船が十数隻建造された⁴⁾。これら の一部は船型改良や可変ピッチプロペラの採用 など様々な省エネ手段を帆と組み合わせた結果、 燃料消費量約 50%の低減化という実績を示した が、原油価格の下落により現在ではほとんど見受 けられない4)。しかし、環境負荷低減への関心か ら再び帆装船(次世代型帆装船 4)の研究開発がお こなわれるようになりつつある。この次世代型帆 装船は地球環境保護のための CO2 排出量削減を 主目的においているため、極端な場合燃料費削減 額が帆装のための費用と同程度であっても、その 意義を失わない。この点は、燃料削減額が帆装費 用を上回らなければならない燃料費削減を目的 とした過去のオイルショック時の帆装船とその 意味合いが異なる4)。

次世代型帆装船の実現に向けては数多くの課題が存在する。その課題の一つとして帆の干渉影響による推進力の低下が挙げられる。これは、複数帆を船体甲板上に設置した場合に、帆は他の帆や船体からの干渉を受けるため、流れを乱す障害物が周囲に存在しない帆単独と比較して発揮できる最大推進力が低下するという現象である。帆走性能を十分に発揮するためには、従来数多く研究されてきた帆単独 1)2)の形状の開発に加え、この干渉影響を最小化することが不可欠である。しかし、これらに関する研究 3)は帆の形状が多様であることもあって実績が多くはなく十分とは言えない。

本研究では、干渉影響を小さくするための新た に提案する帆の角度制御によって得られる推進 力係数を風洞実験に基づいて計測し、過去に提案 された帆の角度制御法³⁾との比較をおこなう。さ らに、得られた実験結果より、次世代型帆装船の 定常帆走性能の数値解析をおこなうことで、新た に提案する帆の制御法の定量的評価をおこなう。

2. 干渉影響を考慮した帆の流体力特性

次世代型帆装船は帆を複数用いることが想定される³⁾。そこで複数の帆の角度を個別に制御する

ことが帆と帆および船体と帆の干渉にどのような 影響をおよぼすかを風洞実験で調べた。

2.1 風洞実験

2.1.1 風洞模型

次世代型帆装船の風洞模型を図-2.1 に示す。船 体は文献³⁾で用いた満載状態のばら積船模型であ る。ばら積船の外観図と主要目を図-2.2 と表-2.1 に示す。模型の形状は細部を除いて基本的には想 定する実船と幾何学的に相似になるようにした。

帆は文献 ³⁾と同型の高揚力複合帆を用いる。こ れは硬帆・スラット・三角形軟帆から構成される 甲板クレーン兼用型複合帆である。複合帆模型は 文献 ³⁾と同じ寸法で今回新たに製作した。複合帆 の図面を図-2.3 に示す。硬帆は NACA0030 型で あり支柱台(図-2.3:Mast stand)と合わせてマスト の役割 ³⁾をする。スラットは鉛直方向に見て円弧 形状、軟帆は船体側面から見て三角形であり、軟 帆は変形可能な柔らかい素材である。



図-2.1 次世代型帆装船模型



図-2.2 模型船外観図³⁾

2.1.2 実験の方法

実験は当所変動風水洞でおこなった。風洞試験 では、後述の手順(2.1.4節参照)に従って帆の角度 を制御していき、干渉影響を含んだ帆の推進力係 数の最大値とその時の帆の角度を見かけの風向ご とに求めた。ただし、風洞実験では模型船は動か ないので、見かけの風向は対地風向に一致する。 干渉影響を含んだ帆の推進力係数は、図・2.1 に示 す帆を搭載した模型船上の個々の帆に働く前後力、 左右力、帆の旋回軸周りのモーメントを計測する ことで求めた。力とモーメントを計測した三分力 計は、図・2.4 のように模型船上部構造物を設置し た回転盤の下に設置されており、各帆に支柱台(図 -2.3:Mast stand)を介して直接接続されている³⁾。 帆の支柱台は船体に開けられた円孔を通じて三分 力計に取り付けられているため船体には接触して いない³⁾。

それぞれの三分力計は回転可能な帆角制御盤上 に設置してあり、4 つの帆の迎角は独立に遠隔操 作で 0.1°刻みの変更が可能である。

表-2.1 帆装船主要目 3)

	Ship	Model
Scale ratio	1	1/148
$L_{OA}[m]$	185	1.254
$L_{pp}[m]$	177	1.2
B[m]	30.4	0.206
D[m]	16.5	0.112
d _{Full} [m]	11.6	0.079
A _{TFull} [m ²]	553	0.025
A _{LFull} [m ²]	1977	0.092







各帆の番号を船首側から No.1~4 と定義する。 帆に加わる力とモーメントの座標系と関係する変 数を図-2.5、2.6 に示す。

風洞床面には約10cmの境界層が存在し⁵⁾、複 合帆のブーム付近までが境界層内に含まれるが、 境界層の補正はおこなっていない。これは、文献 ³⁾の実験状態と一致させるためである。



図-2.5 帆の番号と船体座標系・変数定義 3)



2.1.3 実験状態

同型の高揚力複合帆を用いて干渉影響を調べた 文献 3)に倣い、複合帆のスラット角 ys およびブ ーム角 yB は最大揚力が得られる 35°と 30°でそれ ぞれ一定とした。この時の三角形複合帆の投影面 積 Ssail は 0.0176m²、アスペクト比 AR は 1.28、 コード長 C は 0.117m である。投影面積 Ssail は帆 を硬帆の鉛直対称断面に対して垂直に見た時の硬 帆とスラット投影面積に軟帆面積(ブーム・軟帆面 に対して垂直に見た時の面積)を足した値と定義 した。アスペクト比 AR およびコード長は次式で 定義する。

$$AR = \frac{H^2}{S_{sail}}$$
(2.1)
$$C = \frac{S_{sail}}{H}$$

5

H は帆の高さ[m]を表す。

実験のはじめに、船首方位 80°、各帆の迎角 10°の状態において、それぞれの帆の揚力・抗力 と旋回軸周りのモーメントへの風速の影響を調べ、 風速15m/s以上でその無次元値がほぼ変化しなく なることを確認した。今回は上記1状態のみで確 認したが、この結果は異なる状態を含む過去の帆 装船に関する風洞実験^{例えば13)}における風速影響の 調査結果と一致する。そこで、帆のコード長を代 表長さとした場合の風速15m/sにおけるレイノル ズ数 Re 約 1.6×10⁵以上から実船スケールのレイ ノルズ数にかけては、迎角や見かけの風向によら ず風速による実験結果への影響はないと仮定して、 目標風速20m/sの一様風のみで実験をおこなった。

本模型寸法では風向 90°、帆の迎角 30°にお いて閉塞率(風洞断面と模型断面積比)は最大値 3.0%となる。この閉塞率では阻塞影響(閉塞によ る抵抗の変化)はほぼ見られないことが報告 のさ れているため、阻塞影響による風速修正はおこな っていない。

2.1.4 帆の角度制御法

本研究では、干渉影響を考慮しない"単独帆重ね 合わせ"と過去に提案された"傾斜配列法"³⁾に加え、 新たに提案する3つの帆の角度制御方法の計5種 類の角度制御法を調査する。新しい制御方法をそ れぞれ"傾斜角度差保持法"、"反復傾斜配列法"、" 斜め追風両開き法"と呼ぶ。以下に5種類の帆の角 度制御法の概要を述べる。

(1) 単独帆重ね合わせ

単独帆重ね合わせは干渉影響を受けない帆の流 体力特性を意味する。つまり、一般的には(干渉が 良い方向に働く場合もあるかもしれないため)帆 と帆および帆と船体の干渉を理想的に0にできた 場合に到達できる帆の流体力特性の限界を示す。

単独帆の性能は、図-2.7 のように船体を設置せ ずに一本の支柱台に帆を取り付けた状態で計測を おこない、支柱台のみの状態での計測値を差し引 いた値で評価をした。単独帆の設置高さは船体の ある場合と同じ高さである。迎角の変化は主に 10° 刻みでおこない揚力の変化の大きい範囲で は 5° 刻みで計測をおこなった。帆の迎角 α は船 体前後方向の推進力が最大となるように、船体基 準風向 $\psi=30^{\circ}$ で $\alpha=10^{\circ}$ 、 $\psi=40^{\circ}\sim50^{\circ}$ で $\alpha=20^{\circ}$ 、 ψ=60°~90°で α=30°、ψ=100°~170°で α=35°、 ψ=180°で 70°と設定した。

単独帆重ね合わせの性能は No1,2,4 の 3 つの模 型単独帆の性能の平均値とした。No3 の帆が含ま れないのはスラット角とブーム角が干渉影響の実 験時と異なる状態で計測をおこなったためである。



図-2.7 単独帆の実験状態

(2) 傾斜配列法

本方法は文献³⁾で上野らが提案した干渉影響を 小さくするための複数帆の角度制御法である。こ の制御法を4本の帆を有する帆装船を例にとって 以下に示す。

No1~4 帆の迎角を 0°から同時に増加させる。

 <u>4</u>つの帆の船体前後方向の推進力係数の平均 値 C_{xsail} が最大となる迎角で、No.1 帆の迎角を定 める。

③ ②の状態で No1 帆の迎角を固定し、No.2~4
 帆の迎角を②で求めた角度から同時に増加していく。

④ ②同様に、 $\overline{C_{xsail}}$ が最大となる迎角で、No.2 帆の迎角を定める。

⑤ 以降 No.3,4 の帆と繰り返す。

本方法は、追い風のような No1 の帆が風下にあ る状態でも必ず No.1 帆から迎角を定めていく。 今回の風洞実験では迎角 α の変化刻みは 2.5°と した。

(3) 傾斜角度差保持法

本方法は新たに提案する帆の角度制御法の1つ である。傾斜配列法³⁾では、船首側の帆から順番 に迎角を定めるため、向風状態では船首側の帆ほ ど船尾側の帆からの干渉影響の考慮が不十分であ ると考えられる。本法では傾斜配列法³⁾で定めた 4 本の帆の迎角の差が最適であると仮定して以下 のように帆の角度を制御する。

① 傾斜配列法³⁾により4本の帆の迎角を求める。
 ② ①で定めた帆の状態から、4本の帆の角度の
 差を保ちながら、すべての帆の迎角を同時に同量
 だけ微小角増減させる。

③ ②で微小角変化させたときに、 C_{xsail} が増加 する方向にすべての帆の迎角を同時に同量さらに 変化させていく。

 ④ C_{xsail} が最大となる迎角で4本の帆の迎角を 定める。

傾斜配列法³⁾と同様に追風のような No1の帆が 風下にある状態でも必ず No.1 帆から迎角を定め ていく。今回の風洞実験では迎角αの変化刻みは 微小迎角を含み2.5°とした。

(4) 反復傾斜配列法

本方法は新たに提案する帆の角度制御法の1つ である。上述のように、傾斜配列法³⁾では風下の 帆からの干渉影響の考慮が不十分であると考えら れるため、本方法では傾斜配列法³⁾で定められた 迎角の状態から再度傾斜配列法³⁾の手順に則って No.1から No.4 の迎角を順に定めてく。そのため、 この方法は傾斜配列法³⁾を 2 回反復することによ って迎角を定める方法と言える。以下に本方法の 定義・手順を示す。④までは傾斜角度差保持法と 同じである。

① 傾斜配列法³により4本の帆の迎角を求める。
 ② ①で定めた帆の状態から、4本の帆の角度の
 差を保ちながら、すべての帆の迎角を同時に同量
 だけ微小角増減させる。

③ ②で微小角変化させたときに、 C_{xsail} が増加 する方向にすべての帆の迎角を同時に同量さらに 変化させていく。

④ C_{xsail} が最大となる迎角で No.1 帆の迎角を 定める。

⑤ No.1 帆の迎角を④で定めた角度に固定し、その状態から①で定めた No2 帆以降の3つの帆の迎角の差を保ちながらそれら3つの帆の迎角を同時に同量だけ微小角増減させる。

 ⑤ ⑤で微小角変化させたときに、C_{xsail}が増加 する方向に No.2~No.4 の帆の迎角を同時に同量 さらに変化させていく。

 ⑦ C_{xsail} が最大となる迎角で No.2 帆の迎角を 定める。

⑧ 以降 No.3,4 の帆と繰り返す。

追風のような No1 の帆が風下にある状態でも 必ず No.1 帆から迎角を定めていく。今回の風洞 実験では迎角 α の変化刻みは微小迎角を含み 2.5°とした。

(5) 斜め追風両開き法

本方法は真追い風状態の両開き法 3)を斜め追風 状態にも適用可能となるように拡張したものであ る。両開き法 3)とは図-2.8 に示すように帆を交互 に左右に展開する方法である。この場合スラット 角およびブーム角も対称にする。真追い風の場合 は No.1 帆を左右どちらの舷に展開させても対称 性から帆の流体力特性は同じである。しかし斜め 追風の場合は異なる。



図-2.8 斜め追風両開き法の試験状態

そこで斜め追風両開き法では、より高い推進力 を得るために右舷側からの斜め追風の場合は No.1 帆を右舷側に、左舷側からの斜め追風の場合 は No1を左舷側に展開すると定義する。また、図 -2.9 のように、船体中心線を軸として左右対称に 帆の角度を展開する。これら帆の展開方法の定義 理由は付録1で述べるとおりである。



図-2.9 斜め追風両開き法の帆の展開方法の定義

斜め追風両開き法の手順を以下にまとめる。 ① 追風の風向きと同舷側に No.1 帆を展開し、 以降の帆を左右交互に展開する。

② 図-2.9のように全ての帆の展開角が船体中心 線対称となるように、No1の迎角を0°から4本の 帆の迎角を同時に同量増加していく。

③ ②の手順により、 C_{xsail} が最大となる迎角でNo.1~4の帆の迎角を定める。

実験の範囲は(見かけの)風向きが 140°から 180°とした。140°より向風状態では、向風になる に従って傾斜配列法³⁾による推進力係数との差が 開き、風圧係数の改善が見られないと考えられる ため本方法による計測はおこなっていない。今回 の風洞実験では迎角αの変化刻みは主に10°とし、 風圧係数の変化が大きい条件では5°とした。

2.1.5 実験結果の評価の方法

まず、三分力計で計測された個々の帆の前後力、 左右力、旋回軸周りのモーメントとその時の迎角 から図・2.6 に基づき帆に働く揚力 L、抵抗 D、旋 回軸周りのモーメント M を求める。さらに(2.2) 式に従って無次元化をおこなうことで、それぞれ の帆の揚力係数 C_L 、抵抗係数 C_{D} 、モーメント係 数 C_M を得る。対地風速 UAには風洞内に設置した 熱線風速計によって検出される物理値を用いた。

$$C_{L} = \frac{L}{0.5\rho_{A}U_{A}^{2}S_{sail}}$$

$$C_{D} = \frac{D}{0.5\rho_{A}U_{A}^{2}S_{sail}}$$

$$C_{M} = \frac{M}{0.5\rho_{A}U_{A}^{2}S_{sail}C}$$
(2.2)

次に、図-2.5 と図 2.6 に基づき、個々の帆に作 用する船体前後方向の無次元係数:推進力係数 Cxsail、帆に作用する船体左右方向の無次元係数: 横力係数 Cysail、旋回軸周りの帆に作用するモー メント係数 CNsailを(2.3)式より計算する。

$$C_{xsail} = C_L \sin \psi - C_D \cos \psi$$

$$C_{ysail} = C_L \cos \psi + C_D \sin \psi$$

$$C_{nsail} = C_M$$
(2.3)

さらに、平均推進力係数 $\overline{C_{xsail}}$ 、平均船体横力 係数 $\overline{C_{ysail}}$ 、船体中央周りのモーメント係数 $\overline{C_{nsail}}$ は式(2.4)で計算される。

$$\overline{C_{xsail}} = \sum_{i=1}^{4} C_{xsail}^{i} / 4$$

$$\overline{C_{ysail}} = \sum_{i=1}^{4} C_{ysail}^{i} / 4$$

$$\overline{C_{nsail}} = \sum_{i=1}^{4} C_{nsail}^{i} + \sum_{i=1}^{4} \frac{x_i}{C} C_{ysail}^{i}$$
(2.4)

ここに、i は帆の番号を表し、x_i は船体中心から それぞれの帆の旋回軸までの前後距離(船首方向 を x_i 正とする)を表す。

以上、上記手順により、帆の平均値推進力係数 C{xsail} の最大値とそのときの個々の帆の迎角を (見かけの)風向ごとに求め、帆の角度制御法の性 能を評価する。

2.2 実験結果

船首方位(見かけの風向)ごとに上述の各帆の角 度制御法によって得られる最大 C_{xsail} を図-2.10 に示す。また、その時の迎角における C_{ysail} と $\overline{C_{nsail}}$ を図-2.11,2.12に、帆の角度制御法の違い による最適迎角の違いを船首方位(見かけの風向) ごとに図-2.13、2.14に示す。図-2.15,2.16に(見 かけの)風向 ψ =40°における傾斜配列法³と反復 傾斜配列法の最適迎角の帆の配列状態を示す。

図-2.10 より、傾斜配列法³⁾・傾斜角度差保持 法・反復傾斜配列法の3つでは帆に作用する船の 前後方向の推進力係数に大きな差がないことが確 認できる。また、この3法は向風から横風では干 渉影響が小さく単独帆重ね合わせの状態に近いこ とが確認できる。一方、横風から追い風にかけて は干渉影響が大きいことが確認できる。これは、 船尾にある船橋が風上になることが原因である。 斜め追風両開き法では、推進力係数が従来の傾斜 配列法³⁾より小さくなることが明らかとなった。 この原因については2.3節の考察で示す。

図-2.11 より、推進力係数同様に傾斜配列法 3)・傾斜角度差保持法・反復傾斜配列法の3つで 帆の横力係数に大きな差は見られないが、斜め向 風付近で傾斜角度差保持法と反復傾斜配列法が傾 斜配列法 3)による値よりも小さくなり、傾斜角度 差保持法によるものが最も小さくなることが分か った。この傾向は複数回の計測により確認してい るが、帆の角度制御法の違いという以外の明確な 理由は現段階では不明である。斜め追風両開き法 は傾斜配列法 3)に比べて帆の横力係数は小さくな り0に近い値をとる。これは、帆の向きの対称性 によって各帆の横力が打ち消しあうためと推測さ れる。図-2.12 より、横力係数同様に、船体中央 周りの帆のモーメント係数は、傾斜配列法³⁾・傾 斜角度差保持法・反復傾斜配列法の3法で大きな 差は見られないが、斜め向風付近で傾斜角度差保 持法と反復傾斜配列法が傾斜配列法 3)よりも絶対 値が小さくなることがわかる。ただし、横力係数 とは異なり反復傾斜配列法が最も小さい。斜め追 風両開き法は傾斜配列法 3)に比べて帆のモーメン ト係数は小さくなり 0 に近い値をとる。これは、

個々の帆の横力によるモーメントが打ち消しあう ためと考えられる。

傾斜配列法³⁾・傾斜角度差保持法・反復傾斜配 列法の結果の関係を明確にするために図-2.17, 2.18 に傾斜角度差保持法と反復傾斜配列法によ る傾斜配列法³⁾からの風圧係数の変化率を示す。

図・2.17 より、傾斜角度差保持法の推進力係数 は向かい風ほどその変化率が大きく、最大 5%程 度大きくなることが確認できる。これは、図・2.13 に示す最適迎角の傾斜配列法³⁾からの変化量が、 向風になるほど大きくなるためであると推測され る。横風から真追い風では傾斜配列法³⁾からの最 適迎角の変化はないため変化率は0である。横力 係数とモーメント係数は向風の範囲では最大約 10%、20%それぞれ小さくなることが確認できる。

図-2.18 より、反復傾斜配列法による推進力係 数は横風から向風の範囲で、向風になるほどその 変化率が大きい。その増加率は傾斜角度差保持法 と同程度で最大 5%程度である。向風の範囲では 横力係数とモーメント係数は最大でそれぞれ約 5%と 30%小さくなることが確認できる。方位角 が 100deg と 150deg、160deg の場合など、横風 から追風の範囲で風圧力係数に変化がない方位角 では反復傾斜配列法と傾斜配列法の最適迎角の差 がないことが図-2.13 との比較からわかる。実験 結果および 2.3 節に示す考察(図-2.20)と実験時の 軟帆の状態の観察から、この反復傾斜配列法の横 風から追風の範囲では風向によって推進力係数は 大きくなる点と変化のない点が存在する現象には 失速が関係しているものと考えられる。すなわち、 傾斜配列法³⁾では帆の角度は迎角を前の帆以上に するため、仮に No.1 帆の迎角を定めるときに No.2 以降のいずれかの帆が失速していてもその 帆の迎角を小さくすることができないので失速を 抑えることができない。しかし反復傾斜配列法で は、No.2以降の帆の迎角を推進力係数の平均値が 増加する方向に変化させることが可能であるため、 傾斜配列法³⁾で失速の起こった No.2 以降の帆の 推進力を改善できる。最適迎角の変化のある(見か けの)風向では横力係数とモーメント係数も変化 していることが図-2.18から確認できる。







図-2.15 傾斜配列法³⁾の帆の配列(ψ=40°)



図-2.16 反復傾斜配列法の帆の配列(ψ=40°)





図-2.14 斜め追風両開き法による最適迎角



図-2.17 傾斜角度差保持法による傾斜配列法³⁾ からの風圧係数の変化率



図-2.18 反復傾斜配列法による傾斜配列法³⁾か らの風圧係数の変化率

2.3 各帆にはたらく流体力に関する考察

最初に斜め向風 *w*=60deg における帆の角度 制御法ごとの各帆の推進力係数を比較する。その 結果を図-2.19 に示す。本図より、斜め向風では 風上の帆の推進力係数は干渉影響により単独帆よ りも大きくなるが、風下の帆になるに従って推進 力係数は次第に小さくなっていき、No.3,4 帆では 単独帆よりも小さくなる傾向が、帆の角度制御方 法によらず明らかとなった。また、傾斜角度差保 持法と反復傾斜配列法では、傾斜配列法に比べ風 上の帆の推進力は小さくなるものの、それ以降の 3つの帆の推進力は改善されるため、全体として 推進力が改善されることがわかる。これは、傾斜 配列法において斜め向風では風上から帆の角度を 決定していくため、風下からの干渉影響を十分に 考慮できないのに対して、傾斜角度差保持法と反 復傾斜配列法では、傾斜配列法で全ての帆の角度 を決定した後に、再度全体の帆の推進力のバラン スを考慮して帆の角度を決定できるためと考えら れる。

第2に斜め追風 *y*=140degにおける各帆の揚力 係数を斜め両開き法と傾斜配列法とで比較する。 その結果を図・2.20 に示す。本図より、反復傾斜 配列法を用いて No1 帆より後ろの帆の角度を調 整すると No.3 帆の揚力係数が傾斜配列法と比べ 改善されることがわかる。







また、斜め追風 *w*=140deg における帆の角度制 御法ごとの各帆の推進力係数の比較を図-2.21 に 示す。本図り No.1 と 3 の帆の推進力係数が大き く低下していることがわかる。この原因は、試験 で比較を行った右舷側からの斜め追風の場合、斜 め両開き法では帆の制御方法上 No.1 と No.3 の帆 の迎角は 90 度以上になるため、それらの帆の揚 力は失速により大きく低下するという点が挙げら れる。



図-2.21 斜め追風 *ψ*=140deg における各帆の推進力係数

3. 定常帆走性能

帆の角度制御法の違いによる流体力特性の違い が船速と馬力にどう影響するかを調べるために数 値計算によって定常帆走性能を推定した。

3.1 船体に働く風圧係数の推定

定常帆走性能の解析には船体に働く風圧係数が 必要であるので、2章で述べた風洞実験で得られ た帆の風圧係数をもとに船体に働く風圧係数を推 定する。

帆装船全体に働く風の力とモーメントは帆のない船体に働く力とモーメントと、帆に働く力とモーメントと、帆に働く力とモーメントの重ね合わせで表現できると仮定すれば、 (3.1)式で表現できる。

(帆装船全体に働く力とモーメント) =(帆装船の船体のみに働く力とモーメント)+(帆 装船の帆のみに働く力とモーメント) (3.1)

モーメントは全て船体中央周りで定義する。右辺 第1項には帆から船体への干渉影響を考慮し、第 2項は帆と帆・帆と船体の干渉影響を考慮する。 その上で、右辺第1項の干渉影響については帆の 制御法の違いによる差は無視できると仮定する。

2 章で述べた今回の風洞実験では(3.1)式左辺に 対応する計測はしていないが、同じ模型船を用い た文献³⁾の風洞実験値を使えば上記仮定によって (3.1)式の右辺第1項を(3.2)式で求められる。 (帆装船の船体のみに働く力とモーメント) =(帆装船全体に働く力とモーメント)-(帆装船の帆 のみに働く力とモーメント) (3.2)

右辺第1項、第2項は同じ帆の角制御法による文献³⁾の実験値を用い、(3.1)式同様に干渉影響については帆の制御法の違いによる差は無視できると仮定する。

(3.1)式の右辺第2項は2章の図-2.10~2.12に 示す今回の風洞実験で得られた各帆の制御法によ る値を用いる。これにより、(3.1)式左辺では帆の 制御法の違いを考慮した帆装船全体に働く風圧係 数を求めた。

(3.1)式右辺第1項に対応する帆装船の船体部分の風圧係数(Cxhull,Cyhull,CNhull)の推定結果を図-3.1に示す。無次元化は(3.3)式による。

$$C_{Xhull} = \frac{X_{hull}}{0.5\rho_A U_{AA}^2 A_T}$$

$$C_{Yhull} = \frac{Y_{hull}}{0.5\rho_A U_{AA}^2 A_L}$$

$$C_{Nhull} = \frac{N_{hull}}{0.5\rho_A U_{AA}^2 A_L L_{oa}}$$
(3.3)

$$C_{Xship} = \frac{X_{ship}}{0.5\rho_A U_{AA}^2 A_T}$$

$$C_{Yship} = \frac{Y_{ship}}{0.5\rho_A U_{AA}^2 A_L}$$

$$C_{Nship} = \frac{N_{ship}}{0.5\rho_A U_{AA}^2 A_L L_{oa}}$$
(3.4)



(3.1)式および図-3.1・図-2.10~2.12から帆装船 全体の風圧係数(C_{Xship},C_{Yship},C_{Nship})を帆の角度制 御法毎に推定した結果を図-3.2~3.4に示す。帆装 船全体の風圧係数は(3.4)式で無次元化した。見か けの風向が0°から30°の範囲では帆によって推 進力が得られないため、縮帆を想定して図-3.1の 値をそのまま推定値とした。

図-3.2~3.4 に示す"単独帆重ね合わせ"は、図 -2.10~2.12 に示す干渉のない帆(単独帆重ね合わ せ)と図3.1の帆の干渉を考慮した船体のみに働く 風圧力・モーメントの和の無次元値である。つま り、船体および他の帆から干渉を受けない帆を持 つような帆装船全体に働く風圧係数であり、一般 的に帆の受ける干渉を理想的に0にできた場合に 到達できる帆装船の風圧力特性の限界を示すと考 えられる。







図-3.3 帆を有する船体に働く横力係数の推定値

2 章で示した通り今回の風洞実験における風速 分布は境界層の修正を行っておらず、得られた帆 の風圧係数は層流影響を含むため、帆装船全体に 働く風圧係数も一般に実船が遭遇する風の風速分 布とは異なると考えられる⁸⁾。風洞実験データに 対する風速分布の影響を修正する方法⁹⁾が提案さ れているが、本解析は帆の角度の制御法による帆 走性能の違いを明らかにすることが目的であるこ と、提案されている修正方法⁹⁾が帆装船にまで適 用可能か明らかでないことから、境界層を含む風 速分布に関する修正はおこなわない。



図-3.4 帆を有する船体に働く船体中央でのモー メント係数の推定値

3.2 計算モデル

定常帆走状態における前進方向船速と馬力を推 定した。解析には実海域性能推定プログラム VESTA¹⁰⁾を用いた。

3.2.1 支配方程式と計算法

本解析で用いた VESTA¹⁰による計算法を示す。 図-3.5 に座標系を示す。前後・左右・回頭の定常 釣合い方程式を図 3-3.5 の座標系($\overline{X}, Y, \overline{Z}$)に座 標変換した(3.5)式を用いて、任意のプロペラ回転 数について船速・斜航角・舵角を求める。

$$\begin{split} \overline{X} &= X \cos \beta - Y \sin \beta = 0 \\ \overline{Y} &= X \sin \beta + Y \cos \beta = 0 \\ \overline{N} &= N = 0 \\ X &= -R_{srill}(V) + (1 - t)X_P(N_P, V) \\ &+ X_D(\beta) + X_R(\beta, \delta) + R_A(U_{AA}, \varphi_A) \\ &- \Delta R_W(V, \beta; H_W, T_W, \theta_W) \\ Y &= Y_D(\beta) + Y_R(\beta, \delta) + Y_A(U_{AA}, \varphi_A) \\ &+ Y_W(H_W, T_W, \theta_W) \\ N &= N_D(\beta) + N_R(\beta, \delta) + N_A(U_{AA}, \varphi_A) \\ &+ N_W(H_W, T_W, \theta_W) \end{split}$$

ここで(3.5)式の添え字の still は平水中抵抗、 P はプロペラスラスト、D は斜航流体力、R は舵力、A は風による抵抗、W は波による定 常漂流力を表す。

さらに(3.6)式からトルクと機関出力を求める。 VESTA¹⁰⁾ではトルクリミットなどの主機特性を 模擬することができるが、本解析ではそれらは考 慮しない。

$$Q_{p} = \rho N_{p}^{2} D_{p}^{5} K_{Q}(J) / \eta_{R}$$

$$P = 2\pi N_{p} Q_{p} / \eta_{t}$$

$$\hbar t \in U_{n}$$
(3.6)

$$K_{Q} = C_{KQ0} + C_{KQ1}J + C_{KQ2}J^{2}$$
(3.7)



図-3.5 定常帆走性能解析における座標系¹⁰⁾

3.2.2 支配方程式の各項

本解析で用いた VESTA による(3.5)式の各項の 計算法を以下に示す¹⁰⁾。

・平水中抵抗(R_{still})

$$R_{still} = 0.5 \rho L_{PP} d_{mid} \\ \times (C_{t1} V + C_{t2} V^2 + C_{t3} V^3)$$
(3.8)

ただし、

$$K_{T} = C_{KT0} + C_{KT1}J + C_{KT2}J^{2}$$
(3.10)

$$J = \frac{(1-w)V}{N_P D_P} \tag{3.11}$$

・斜航流体力とモーメント(X_D、Y_D、N_D)

・ 舵力とモーメント(X_R、Y_R、N_R)

$$X_R = -0.5\rho L_{PP} d_{mid} V^2 (1-t_R) F_N '\sin\delta$$

 $Y_R = -0.5\rho L_{PP} d_{mid} V^2 (1+a_H) F_N '\cos\delta$ ^(3.13)

$$N_{R} = -0.5 \rho L_{PP}^{2} d_{mid} V^{2} (x_{R} + a_{H} x_{H}) F_{N}' \cos \delta$$

ただし、

$$F_{N}' = \frac{A_{R}}{L_{PP}d_{mid}} \frac{6.13\Lambda_{R}}{2.25 + \Lambda_{R}} (1 - w_{R})^{2} \times \{1 + C_{RUD}g_{s}(S)\}\sin\alpha_{R}$$
(3.14)

$$\alpha_{R} = \delta - \gamma_{R} \beta \tag{3.15}$$

$$1 - w_R = 1 - w_{R0} e^{-4\beta^2}$$
(3.16)

$$\Lambda_R = \frac{H_R^2}{A_R} \tag{3.17}$$

$$g_{s}(s) = \frac{D_{P}}{H_{R}} K_{\beta} \frac{\{2 - (2 - K_{\beta})s\}s}{(1 - s)^{2}}$$
(3.18)

$$s = 1 - \frac{(1 - we^{-4\beta^2})V\cos\beta}{N_P P}$$
(3.19)

$$K_{\beta} = 0.6 \frac{1 - w e^{-4\beta^2}}{1 - w_{R0} e^{-4\beta^2}}$$
(3.20)

・波定常漂流力とモーメント(Xw、Yw、Nw)
 本解析では波を考慮しないので、Xw=Yw=Nw=0
 とした。

・風圧力とモーメント(X_A、Y_A、N_A)

$$X_A = 0.5 \rho_A U_{AA}^2 A_T C_{Xship}$$

 $Y_A = 0.5 \rho_A U_{AA}^2 A_L C_{Yship}$ (3.21)
 $N_A = 0.5 \rho_A U_{AA}^2 A_L L_{OA} C_{Nship}$

3.3 対象船

本解析に用いた船型は、文献¹¹⁾と同じ43,200 [DWT]型ばら積船で、2章の風洞試験に用いた模型³⁾の実船寸法とほぼ同じである。ばら積船の外 観図を図-3.6に、主要目を表-3.1に示す。流体力 微係数、自航要素、平水中抵抗、舵の干渉係数は 文献¹¹⁾から引用した表-3.2,3.3に示す値を用いた。 プロペラ単独特性は表-3.4に示す値を用いた。

2 章の実験で用いた模型船と解析に用いる対象 船の上部構造は完全には一致しないがその差の影 響は無視できると仮定して、風圧係数は図-3.2~ 3.4 に示す値をスプライン補間して計算に用いた。 ただし、"斜め追風両開き法"では(見かけの)風向 140°以下の向風で実験をおこなっていないので、 同じ範囲の"反復傾斜配列法"のデータを用いた。

item	Dimension
Length overall(L _{OA})	187.4[m]
Length of ship between	10 0[m]
$perpendiculars(L_{PP})$	10.0[11]
Breadth(B)	32.26[m]
Draught at midship(d _{mid})	10.7[m]
Designed speed	14.5[kt]
Block coefficient(C _B)	0.814
Transverse projected	555 9[m ²]
area(A _T)	000.0[III-]
Lateral projected area(A _L)	$2138.7[m^2]$
Rudder area (A _R)	$35.7[m^2]$
Aspect ratio of Rudder	1.689
Propeller diameter(D _P)	6.0[m]
Propeller pitch ratio(P/D _P)	0.721

表-3.1 ばら積船の主要目¹¹⁾

表-3.2 ばら積船の操縦流体力微係数¹¹⁾

Υβ'	0.3191	N _B '	0.1181
Y _{вв} '	0.4577	N _{BB} '	0.0050

表 - 3.3	ばら積船の平水中抵抗係数と舵の干渉

际奴、日加女示					
1-w	0.623	$1 \cdot w_{R0}$	0.624		
1-t	0.784	1-t _R	0.780		
C_{t1}	0.013800	ΥR	0.450		
C_{t2}	0.005690	ан	0.813		
Ct3	0.000312	$x_{\rm H}/L_{\rm PP}$	0.467		
$\eta_{\rm R}$	1.033				

表-3.4 ばら積船のプロペラ単独特性の各係数 (式(3.6)(3.10))

Скто	0.2935	CKQo	0.030220
C _{KT1}	-0.2748	CKQ1	-0.018530
CKT2	-0.1390	C_{KQ2}	-0.024900



図-3.6 ばら積船外観図¹²⁾

3.4 計算条件

解析の対象とした海象・気象を以下にまとめる。 風は一方向の一様風と仮定し、対地風速は 10~ 20m/s を 5m/s 刻み、対地風向は 0°~180°を 15°刻みとした。波はないと仮定した。プロペラ 回転数は風が吹いていない平水中の帆のない船の 速力(以降、平水中船速と定義する)が 14.5knot と 10.0knotに対応する 111.4RPM と 75.8RPM とし た。

文献¹¹⁾同様に、帆は見かけの風向0°~30°で は前進推力が得られないため縮帆するものとする。 また、見かけの風速22m/s以上では構造強度上の 理由から縮帆するものとする。解析結果で縮帆の 条件にあてはまるものは次節で示す解析結果の図 には表示しない。

3.5 解析結果

平水中船速 14.5knot 相当のプロペラ回転数の ときの前進船速を図-3.7に、馬力を図-3.8に示す。 前進船速は(3.22)式で定義される船速の船首方向 成分である。

$u = V \cos \theta$	β	(3.22)
	/-	(0.22)

図-3.7、3.8 では帆の角度制御法の違いによる定 常帆走性能の違いが小さくて分かりにくいので、 傾斜配列法³⁾からの変化率を図-3.9、3.10 に示す。

図-3.9より、傾斜角度差保持法と反復傾斜配列 法いずれも、対地風速 10m/s では最大 0.2%、対 地風速 15m/s では最大 0.4%傾斜配列法 ³⁾から前 進船速が増加することがわかる。斜め向風状態で 改善率が最も大きい。この原因として、図 -2.13,2.14の風圧係数の変化率が斜め向風で最も 大きいことが挙げられる。対地風速が大きいほど 変化率が大きくなるのは、前後方向の力のうち風 による推進力成分が相対的に大きくなるためであ る。一方、斜め追風両開き法では推進力係数が減 少するため前進船速も小さくなる。帆の干渉影響 を無視した単独帆重ね合わせでは、対地風速 10m/s では最大 1%、対地風速 15m/s では最大 1.5%傾斜配列法³⁾から前進船速が増加し、斜め向 風と追風で変化率が大きい。これは斜め向風と追 風で帆の干渉影響が大きいことを示しており、追 い風では船橋との干渉が主に影響していると考え られる。

図-3.10 より、馬力の変化率も前進船速と同様 の傾向を示しており、傾斜角度差保持法と反復傾 斜配列法いずれも、対地風速10m/sでは最大0.2%、 対地風速15m/sでは最大0.4%程度傾斜配列法³⁾ から必要馬力が減少することがわかる。

平水中船速 10knot 相当のプロペラ回転数のと きの前進船速を図-3.11 に、馬力を図-3.12 に示す。 傾斜配列法 ³⁾からの前進船速と馬力の変化率を図 -3.13、3.14 に示す。

図-3.13より、平水中船速 14.5knot の場合と同 様に、平水中船速 10knot 相当のプロペラ回転数 の場合でも傾斜角度差保持法と反復傾斜配列法い ずれも、対地風速 10m/s では最大 0.4%、対地風 速 15m/s では最大 0.7% 傾斜配列法 ³⁾から前進船 速が増加することがわかる。図-3.14 より、必要 馬力は対地風速 10m/s では最大 0.5%、対地風速 15m/sでは最大0.7%程度傾斜配列法³⁾から減少す る。 平水中船速 10knot の場合の 方が 14.5knot の 場合と比べ前進船速と必要馬力の変化率が大きい のは、10knotの方がプロペラスラストに比べ風に よる推進力が相対的に大きいので、風圧係数の差 が結果に影響しやすくなったことが原因と考えら れる。そのため、プロペラ回転数がより小さい状 態での航行ではより大きな改善が期待される。一 方、斜め追風両開き法では推進力係数が減少する ため前進船速も小さくなる。

以上の解析結果より、傾斜角度差保持法と反復 傾斜配列法の傾斜配列法³⁾からの前進船速と必要 馬力の改善率は、風向・風速が良い条件であった としても、それぞれ最大 1%未満とわずかである ことが明らかとなった。しかし、帆の干渉を理想 的に0にできた単独帆重ね合わせの場合であって も、その改善率は同じ向風の範囲では最大 2.3% 程度である。つまり、船速の改善率はわずかでも、 傾斜角度差保持法と反復傾斜配列法による干渉影 響は、傾斜配列法³⁾の干渉影響との比で最大約 3 割改善されることを意味している。

CO2 削減率を考える際、CO2 排出量は燃料消費量に比例するとすれば燃料消費量の削減率を考えればよい。同じ馬力・時間単位の燃料消費率が同じとすると燃料消費量は馬力と航行時間の積に比例する。一方、同一距離を考えると航行時間は

船速に反比例する。以上より、帆の制御法の改良 による馬力の減少率と船速の増加率を本解析で得 られた最大値のそれぞれ 0.7%と 0.7%と想定する と、ごく 簡易に考えれば(100-0.7)/(100+0.7) =0.986となり、本報告で提案する新しい帆の制御 法によって最大約 1.4%の CO2 削減効果が期待で きる。そのため、傾斜角度差保持法と反復傾斜配 列法によって軽減される干渉影響の差とその割合 は有意であると言える。

4. 結言

複数帆を有する次世代型帆装船の帆の干渉影響 を軽減し、帆走性能を向上するための新しい帆の 角度制御法;"傾斜角度差保持法"・"反復傾斜配列 法"・"斜め追風両開き法"の3法を提案した。

干渉影響を含む帆の推進力係数がこれらの方法 によってどのように変化するかを調べるために風 洞実験をおこない以下の点を明らかにした。

- "傾斜角度差保持法"による帆の推進力係数は、これまでの傾斜配列法³⁾と比べて横風から斜め向風の範囲で増加する。その増加率は向風になるほど大きく、最大約5%に達する。横力係数およびモーメント係数はそれぞれ最大約10%と20%減少させる。
- ・"反復傾斜配列法"による帆の推進力係数はこれ までの傾斜配列法³⁾と比べて最大約5%増加す る。推進力係数の増加は横風から斜め向風の範 囲と追風の一部の風向きの範囲で見られ、その 増加率は向風になるほど大きくなる。横力係数 およびモーメント係数はそれぞれ最大約5%と 30%減少させる。
- ・"斜め追風両開き法"による帆の平均推進力係数はこれまでの傾斜配列法³⁾と比べて追波から斜め追波中では、0.1から0.5程度減少する。 横力及びモーメント係数は共に0近くまで減少する。

風洞実験結果をもとに定常帆走性能解析をおこ ない、以下の点を明らかにした。

- ・"傾斜角度差保持法"と"反復傾斜配列法"は、従来の傾斜配列法³⁾に比べて、前進船速と必要馬力をいずれも最大 0.7%程度改善し、斜め向風でその改善率は大きくなる。
- ・"斜め追風両開き法"は、従来の傾斜配列法 ³⁾に 比べて、前進船速は小さくなり、必要馬力は大 きくなる。
- 風速が大きいほどあるいはプロペラ回転数が 小さいほど、新しい帆の制御方法による定常帆

走性能の傾斜配列法 ³⁾からの改善率は大きく なる。そのため、運航状態によっては帆の角度 制御法の違いによる干渉影響の差がより重要 になる。

- ・ 定常帆走時の船速の解析結果によれば、傾斜 配列法³⁾の干渉影響は、"傾斜角度差保持法"と" 反復傾斜配列法"によって斜め向風で最大約3 割軽減可能である。
- ・ 簡易計算での"傾斜角度差保持法"と"反復傾斜
 配列法"による CO2 削減効果は最大 1.4%である。

以上の検討により、次世代型帆装船の帆の角度 制御法としては、干渉影響を小さくするという観 点から、見かけの風向が斜め向風から横風の範囲 では"傾斜角度差保持法"あるいは"反復傾斜配列 法"が、横風から追い風の範囲では"反復傾斜配列 法"が傾斜配列法より有効な方法であることが分 かった。

謝 辞

次世代型帆装船の風洞実験に関するご指導頂い た当所の藤原海洋利用評価研究グループ長に感謝 いたします。

参考文献

- 1) Benefits Brought on the Wind, THE MOTER SHIP, (2000), pp.48-49.
- 2)野尻武生ほか:最大揚力係数 2.42 の大型船舶用 高性能複合帆を開発-燃料消費量および炭酸ガ ス排出量の削減に期待-,三井造船技報 No.178 (2003), pp.132-138.

- 3)上野道雄ほか:次世代型帆装船の基礎研究、海上技術安全研究所報告、第4巻第6号(2004)、 pp.21-31
- 4)上野道雄ほか:次世代型帆装船の基礎研究、海上技術安全研究所報告、第4巻第6号(2004)、 pp.2-3
- 5)藤原敏文ほか:船体に働く風圧力に関する研究 (超大型タンカーの場合)、第70回船舶技術研 究所研究発表講演集(1997)、pp.142-147
- 6)建築物風洞実験ガイドブック、日本建築センター、1994
- 7)上野道雄ほか:次世代型帆装船の基礎研究、海上技術安全研究所報告、第4巻第6号(2004)、 pp.3-20
- 8)藤原敏文ほか:船体に働く風圧力の推定、日本
 造船学会論文集 第183号(1998)、pp.77-90
- 9) W.Blendermann : Estimation of Wind Loads on Ships in Wind with a Strong Gradient, OMAE Vol.1-A (1995)
- 10) M.Tsujimoto, et al. : Development of a Calculation Method for Fuel Consumption of Ships in Actual Seas with Performance Evaluation, Proc. of 32nd OMAE, OMAE2013-11297 pp.1-10, 2013.6.
- 11) 辻本勝ほか:次世代型帆装船の基礎研究、海上技術安全研究所報告、第4巻第6号(2004)、
 pp.62-94
- 12)辻本勝ほか:次世代型帆装船用ウェザールーティングの開発とその評価、関西造船協会論文集、 第242号、2004.
- 13)Fujiwara et al.: Saill-sail and sail-hull interaction effects of hybrid-sail assisted bulk carrier, JMST, 10 (2005) pp. 82-95

18



図-3.7 定常帆走性能(前進船速,船速14.5knot)

図-3.8 定常帆走性能(馬力,船速14.5knot)





図-3.11 定常帆走性能(前進船速,船速 10knot)

図-3.12 定常帆走性能(馬力,船速10knot)



付 録

付録 A. 斜め追風両開き法の詳細検討

斜め追風両開き法の帆の制御法に関する検討結 果を述べる。

A.1 帆の向きに関する検討

斜め追風の場合、非対称性から No.1 帆を左右 どちらの向きに展開させるかによってその流体力 性能が異なると推測される。No1,3 帆を右舷側、 No2,4 帆を左舷側に展開し、左舷側からの追風 (ψ =160°)と右舷側からの追風(ψ =200°)のいずれ も船尾から 20°の追風の 2 状態(図-A.1)の最大 C_{rsail} の比較をおこった。



図-A.1 斜め追風両開き法の帆の向きの違い(船 首下)

図・A.2 に実験結果を示す。左舷側からの風 (ψ=160deg)で No.1 帆の迎角 a が 80°より大 きい範囲で実験結果がないのは、軟帆が安定 せずこれ以上の迎角の範囲での実験が困難 であったためである。本図より、いずれの迎 角においても右舷側から受ける追風の方が 推進力係数は大きくなることがわかる。これ は、風向きに対する帆の展開投影面積の大小 の違いによるものと考えられる。この結果か ら、斜め追風両開き法では追風の方向に対して No.1,3 帆を同舷方向に展開させるものとして定 義する。

A.2 帆の展開する対称軸の違いに関する検討

斜め追風両開き法では帆の左右に展開する角度 が対称になるように制限している。展開する帆の 対称軸を風向にとるか船体中心線にとるか(図 -A.3 参照)の検討をおこなった。 実験結果を図-A.4 に示す。図-A.4 図より、船体 中心線に対して対称に帆を展開する方法の方が、 $\overline{C_{xsail}}$ は大きくなることが確認できる。この結果 から、斜め追風両開き法では船体中心線対称に帆 を展開させるものと定義する。







図-A.3:斜め追風両開き法の帆の展開する対称軸 の違い(左:船体中心線に対称、右:風向きに対称)



の違いによる推進力係数の比較