

大型船用円筒帆の特性に関する基礎研究

八木 光*1・藤井昭彦*2・松原直哉*3

Basic Study of the Performance of A Cylindrical Sail for Large Ships

Hikaru YAGI, Akihiko FUJII and Naoya MATSUBARA

Abstract

Recent soaring bunker price forces ship operators to improve ships' economy. The most direct measure is to improve propulsive performance. In addition, various energy saving devices become feasible in terms of the possible amount of saving money proportional to the percentage of saving and to the oil price even if there exists technological difficulty or density of saving energy. Natural energy, such as wind, wave or solar is very popular for land use energy to cope with global thermal gases. The utilization of wind energy by sails is the most traditional method for ship operation. However, very limited application has been made for modern motor ships. Novel sail concepts, such as rotating cylinder using Magnus Effect, or Turbo Sail utilizing fans had been introduced, but did not reach to the practical or commercial use. It is mainly due to the technological difficulties in large structural mechanism or additional energy to operate the system.

The authors have reached a new concept utilizing the endowed structure and power to minimize the difficulty, focusing in very large ships (VLCC, VLBC). It is a cylindrical sail with air suction, utilizing dodger support structures and power of air intake for main engine and ventilation of ship. As a feasibility study, model tests were conducted in wind tunnel to grasp the order of possible saving as well as the mechanism of flow around the sail. The results have shown that the maximum lift coefficient reaches to the order greater than 7, and reasonable amount of saving can be expected when a total system is realized.

In this paper, lift-drag performance of the cylindrical sail with a fin is presented, including the newly developed test method and the evaluation of air-intake type.

1. 緒 言

風や波などの自然現象が船舶の運航に及ぼす影響は非常に大きく、一般には運行性能を阻害する要因として速力の低下や動揺などが生じる。一方、風や波の持つエネルギーを利用して船舶の性能向上や使用エネルギーとして利用する方法も数多く実用化されている。風の対策を船舶の性能向上という観点から見ると大きく3つに分類される。第1は古来より利用されている風力を帆により推進力に変換するという直接的な方法であり、第2は風力発電装置などを利用し船内用電気エネルギーを得る方法、第3の方法は風

から受ける船体の水面上構造物の抵抗を減少させるという受け身的な方法である。

近年の石油価格の高騰により、大型船舶では多量の燃料油を使うことから運航経済性を高めることが強く求められている。ここでは、自然エネルギーである風を積極的に補助推進力に利用する方法として、船舶が本来持っている機関用の空気吸込みエネルギーを利用した空気吸込み型の円筒帆の概念を紹介するとともに、その基本特性についての基礎研究の結果について述べ、実用化の可能性について記述する。

大型船舶に風力エネルギーを利用する方法は1980年代に帆を補助推進装置として利用するシステムが実用化され、

2008年1月17日受理

*1 東海大学海洋学部船舶海洋工学科 (Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, School of Marine Science & Technology, Tokai University)

*2 三井造船(株)船舶・艦艇事業部基本設計部 (Basic Design Department, Ship & Ocean Project Hqs, Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd.)

*3 (株)三井造船昭島研究所技術統括部 (Research & Development Division, Akishima Laboratories (Mitsui Zosen) Inc.)

実船での運航実績も蓄積された(藤原義則, 1980)が, 現在では風力発電装置搭載船などに限られている(例えば <http://www.gotsu.co.jp>, 2004). 最近では風力推進についても見直しの機運があり, 帆性能の高度化が検討され, 風力利用の期待も高まりつつある(野尻武生ほか, 2003), (藤原敏文ほか, 2002). 一方, 構造物周りの境界層を制御し物体抵抗の減少や揚力を得ようとする試みは古くから研究, 実用化されている(Schlichting, H. and K. Gersten, 1999), (Hoerner, S.H., 1985). 船舶への応用では, マグナス効果を利用した回転円筒型の帆や空気吸込みを利用したターボセイルなどの応用例があるが, 実用化にはいたっていないのが実情である(Charrier, B., *et al.*, 1985). この理由としては, 回転型は駆動機構の複雑さにより大型化に困難さがあり, 空気吸込み形では空気吸込みを行うためのファン駆動用のエネルギーを必要とすること, さらに船体への大型構造物の設置が必要であることなどが実用化の阻害要因と考えられる.

著者らは, タンカーやバラ積み船などの大型専用船を対象とした風力利用補助推進装置として, ドジャー支持構造を利用した円筒型の空気吸込み境界層制御式補助推進システムの概念を考案した(公開特許公報, 2005). これは, 船舶が本来有する機関利用のための空気吸込み能力を利用して帆の推力を得ること, および既存構造物の利用を行うことにより推力を得るための追加エネルギーの削減と構造上の問題を解決する実用的な補助推進力を得ることを目的としたシステムである.

ここでは, 基礎的な調査として模型を用いて実施した空気吸込み型円筒帆の特性を示し, また, 吸込み方式, 開口率影響などの実用化に関する諸要素に関する影響を調査した結果および実船への適用の可能性についても述べる.

まず, 円筒型風力補助推進装置の概念を述べ, 大型風洞用の揚抗力計試験装置の概要と大型円筒帆の揚抗力特性を述べるとともに, スリット型と多孔板型の2種類の空気吸込み方式の揚抗力特性への影響について述べる. さらに, 実用化の観点から推定される補助推進力についての定量的な評価を行う(尾崎他, 2007). また, 基礎実験として行った円筒帆周りの流場について述べ, 揚力発生メカニズムを示す(椎井他, 2005, 2006), (Shiii, *et al.*, 2006)(尾崎他, 2007).

2. 円筒帆の概要

ここでいう円筒帆とは, 船舶が本来有する機関利用のための空気吸込み能力を利用して帆の推力を得ること, および既存構造物の利用を行うことにより, 追加エネルギーの削減と構造上の問題を解決する実用的な補助推進力を得ることを目的としたシステムである. 以下に, 各要素について述べる.

2.1 機関の必要空気量

56,000トンから300,000DWTの大型船舶において主機関, 発電機, 通風等に使用される空気量を調査した結果をFig.1に示す. 送風機は主として軸流型が装備され, 合計最大容量は約1,500-5,600m³/minであり, 船橋部後方に設けた空気取り入れ口から軸流ファンを駆動することにより空気を取り入れている. 大型油槽船の例では, 主機関だけで約3,000m³/minを消費しており, 大型船においては多量な空気を船外から動力を用い機関室に取り入れていることが分かる.

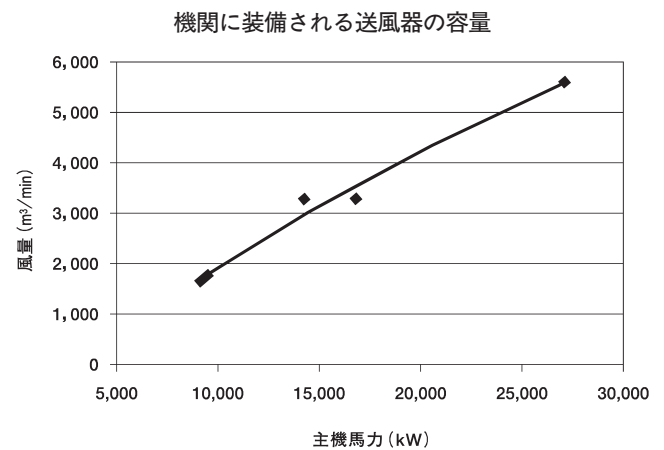


Fig. 1 Capacity of Fans Installed on Large Vessels

2.2 船橋支持構造

大型船の船橋構造はPhoto 1に例示するとおりであり, 船橋部幅が船幅に比べて小さく, 航海時の視界の必要から船橋部から船側までドジャーが延伸して設けられている例が大半である. このドジャー構造は片持ち構造となるため, 振動面から構造支持部材が上甲板とドジャーを結合するように設けられている. このドジャー支持部の構造は船橋の構造部材として機能するほかは, 船舶の走航において



Photo 1 Typical Shape of Bridge of a Large Vessel

は風圧面積を増加するというマイナスの働きをすることが明らかである。

従って、このドジャーに空気吸込みと組み合わせ円筒帆の機能を持たせることにより、単なる抵抗増加要因ではなく、補助的な推力を得ることが可能な構造物となる。

3. 円筒帆の基本特性試験

円筒帆の揚抗力特性の計測は、三井造船(株)昭島研究所の水平回流型の構造物用低速風洞を用いて実施した。風洞計測部の要目は長さ20m×幅2m×高さ3m、上流側5mは交換可能な可動カートで、その後方15mは固定測定部である。風速は最大20m/secである。

3.1 実験装置および配置

円筒帆模型は直径89mm、高さ600mmの円筒型ビニール管に3角状のフィンを追加したものである。事前に実施した小型予備試験をもとに空気吸込み方式として開口率30%のスリット型(I)および開口率40%の多孔板型(J)の2種を作成した。円筒帆の模型をFig.2に、風洞内装置配置図をFig.3に示し、Photo2には計測装置の全景を示す。

風洞内の配置に関しては、円筒型帆は風洞下部の底面に対し、上部に長さ1,200mm、幅1,000mmの地面板を設置することにより、流れの2次元性を確保した。上部地面板上部の円筒直上に空気吸込み用送風機を設け、円筒によ

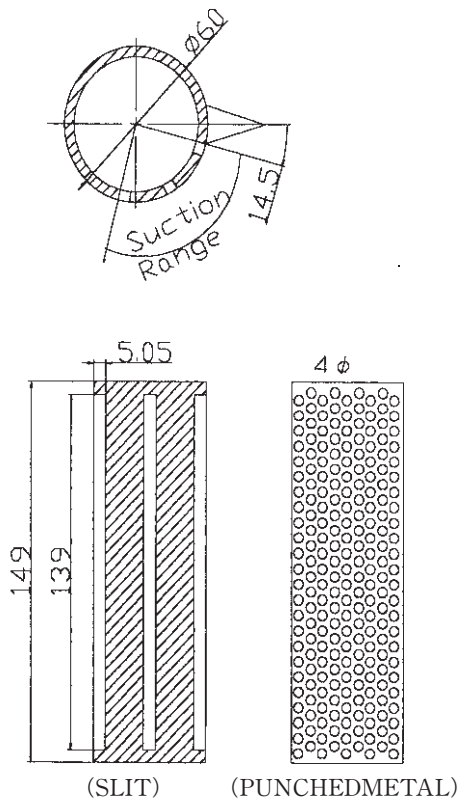


Fig. 2 Models of Circular Cylinder

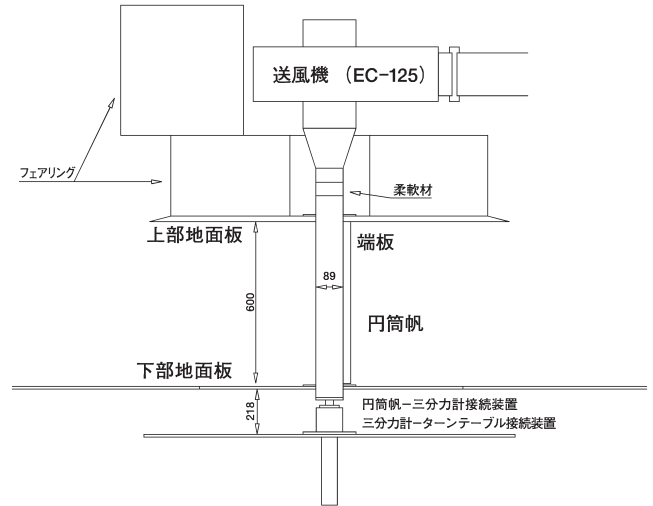


Fig. 3 Arrangement of Test Equipment in the Wind Tunnel

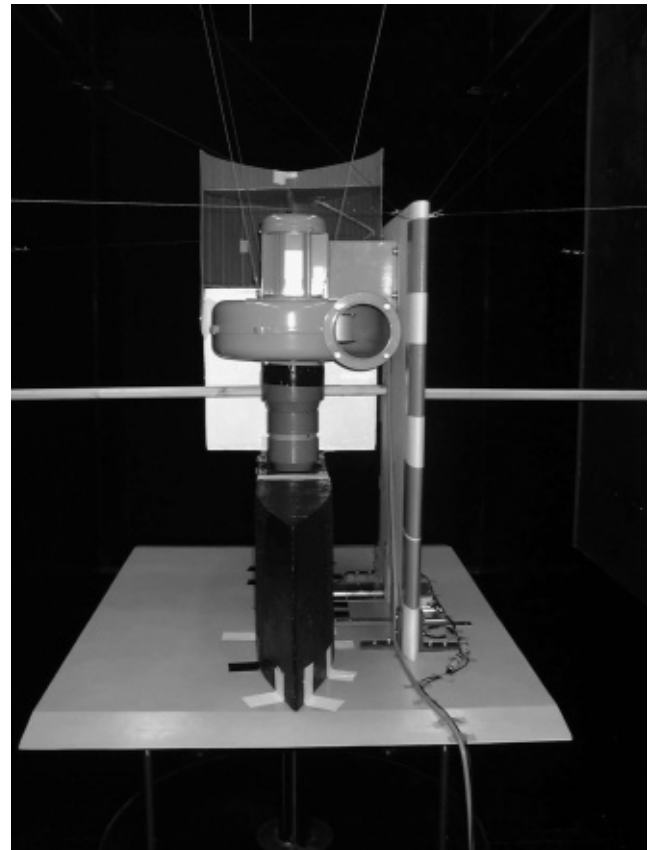


Photo 2 Arrangement of Test Apparatus with Air Suction System (Looking Forward)

り吸込まれた空気は円筒帆内を上昇し、送風機の排出口から一般流と同じ後方に流すようにした。また、上部に配置された空気吸込み装置の均一流への影響を除くため、装置前方には整流体を設け、円筒帆の流れの均一性への影響をできるだけ少なくした。送風機はその支持台を上部地面板上方に設けるとともに、運転時の振動を防止するため、適切に支持部材およびワイヤーによる防振を行った。

Table 1 Particulars Test Apparatus and Arrangement

	Large Scale	Small Scale
Wind Tunnel	Large: for Structures	2-Dim: for Smoke Test
B(m)×H(m)	2.0×3.0	0.8×0.15
Max.Velocity(m/s)	20	10
Model Dia. D (mm)	89	60
Model Height (mm)	600	147
D/B	1/20.6	1/13.3
Suction Air Outlet	Wind Tunnel	Open Air
Air Pipe Connection	Vinyl Film	
Film Thickness (mm)	0.2	

3分力揚抗力計測装置は円筒帆を直下の地面板下部にある計測用ターンテーブルに垂直に配置した。すなわち、円筒帆の下面で検力を行い、円筒上面から空気吸込みを行う縦吸い込み方式を採用した。

空気吸込みは三相汎用送風機（昭和 EC-125ターボファン、出力 1kW）を利用し、制御は三木プーリ V6-15-3、1.5kW によるインバータ制御とした。

Table 1 には配置、模型寸法等試験状態に関する一覧を、小型模型で行った煙風洞の場合と比較して示す。側壁影響を考慮して、大型風洞の計測システムでは模型の風路の閉塞率を示す円筒帆直径と風洞幅の比 (D/B) が約1/20である。

3.2 検証試験

装置全体の精度確認の目的で、風洞における吸込みなし状態での抗力計測を行った。対象模型は大型スリット型模型 (I) で、風速は約 5m/s および 10m/s の 2 速度とした。その結果を Fig. 4 に示す。同図には比較用として煙風洞で行った開口なし小型円筒模型（直径 60mm）の結果

果も示している。なお、揚抗力の無次元化は下式のとおりである。

$$C_D = D / \left(\frac{1}{2} \rho L D V^2 \right), \quad C_L = L / \left(\frac{1}{2} \rho L D V^2 \right)$$

ここで、L、D、V は各々円筒帆の高さ、直径、流入風速である。

図より明らかなように、両模型共、円筒帆の直径および直径高さ比 (D/L) は異なるものの、抗力係数 C_D はほぼ 1.2 から 1.0 の値で計測は他の計測例を参照すると妥当なものと考えられる。小型模型に比べレイノルズ数が 6×10^4 と大きくなると C_D はやや小さくなる傾向がみられ、この点でも妥当な結果といえる。揚力係数 C_L については、スリットなし模型 A でもやや生じており、スプリッタープレート役割を果たすフィンが直径に比し小さく、非定常な揚力の減少効果が少ないことによるものと考えられる。なお、揚力についてはレイノルズ数が 4×10^5 程度で $C_L = 0.2 - 0.6$ 程度の値も報告されており、今回の試験結果は若干低めの結果になっているが、妥当なものと考えられる。

4. 円筒帆の揚抗力特性

4.1 スリット型の特性

スリット型円筒帆の揚力 (C_L)、抗力 (C_D) と迎角の関係を空気吸込み量 (C_Q) をパラメータとして各々 Figs. 5, 6 に、揚抗比を Fig. 7 に示す。

(1) 空気吸込み量の影響

Fig. 5 に示されるように、全迎角で空気量が大きいほど揚力が大きいことが分かる。迎角が増加するにつれ、空気吸込み量に比例して揚力の増加が顕著となる。迎角 0 度近傍では、わずかな空気吸込み量で C_L は約 2 となるが、吸込み量の増加に伴う変化は少ない。0 度付近の揚力の特徴は、円筒後半部の剥離が、スリットの吸込み強さにより剥

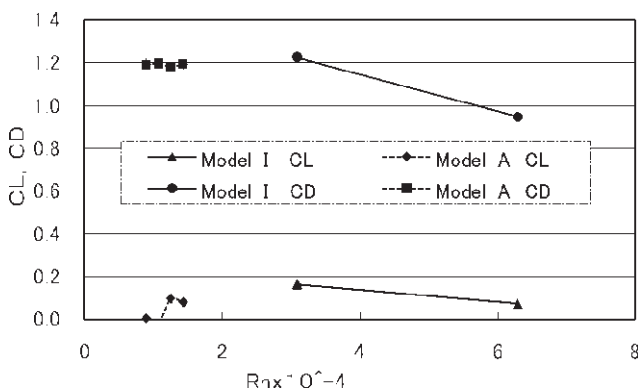


Fig. 4 Lift and Drag Coefficient in a Uniform Flow without Air Suction

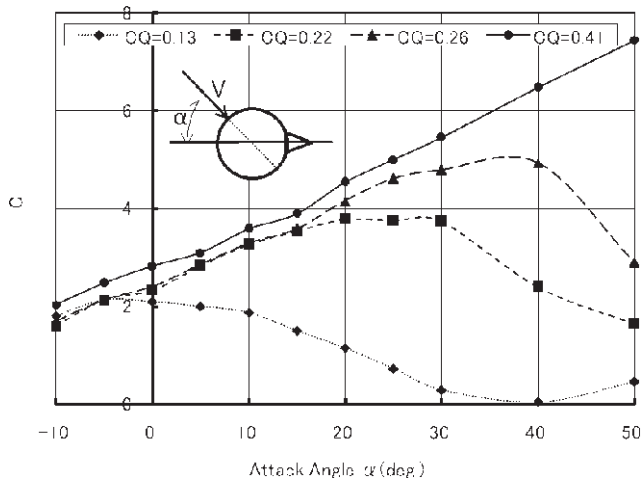


Fig. 5 Lift Coefficient of Slit Type Model (I), $V=9.95\text{m/s}$

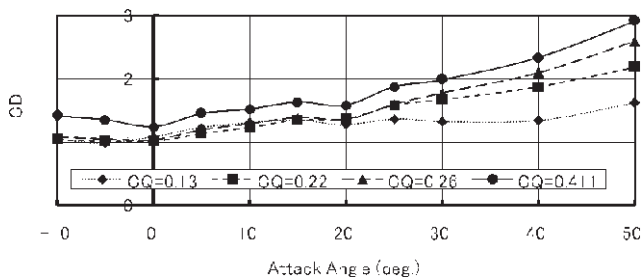


Fig. 6 Drag Coefficient of Slit Type Model (I), $V=9.95\text{m/s}$

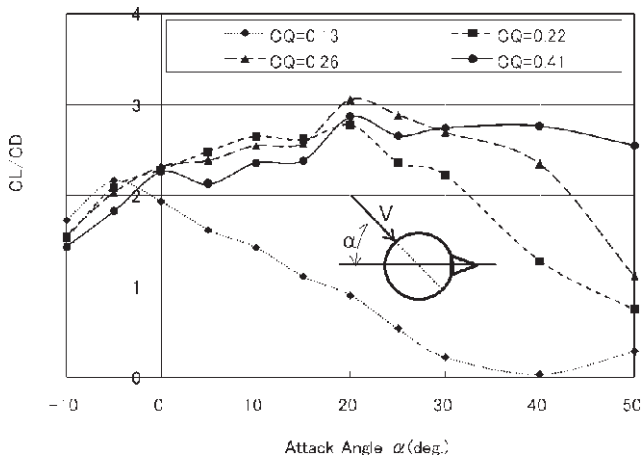


Fig. 7 Lift/Drag Ratio of Slit Type Model (I), $V=9.95\text{m/s}$

離点が大幅に変化しないことを示している。大迎角では、空気吸込み位置が相対的に剝離域の後部にあり、空気の吸込み量に比例して整流効果が前方まで及んでおり、この結果、吸込み強さに比例して揚力が増加することになる。抗力係数 C_D については、空気量の増加に伴いほぼ単調に増加する傾向が分かる。

最大揚力角は吸込み量が大きくなると大きくなり、最小空気量では0度近傍であり、吸込み量が増えるにつれ

増加することが分かる。計測例の最大吸込みである $C_Q=0.41$ では50度以上の迎角において発生することになり、最大揚力は吸込み量が重要なパラメータであることがわかる。

最大揚力係数 C_L の値は、 $C_Q=0.41$ で約7.5となり、一般の帆の特性に比べ、空気吸いこみのエネルギーを付加することにより大きな値が得られることが示されている。また、各空気吸込み量における最大揚力係数も空気吸込み量の増加に伴い大きくなる傾向を示している。

一方、抗力係数 C_D は迎角が大きくなるにつれ増加する傾向にあり、どの空気量においても迎角0度近傍が最も低いことになる。最大抗力係数でみると最大迎角50度で約3となる。これも一般の円筒に比較して大きく、空気吸いこみの負の影響である。

(2) 揚抗比

図より明らかなように、揚抗比 (C_L/C_D) は必ずしも空気量が多い時に最大値を与えない。最小の空気量の場合を除きほぼ20度付近が最大揚抗比を与えることが分かる。揚抗比の特徴的な現象は、最大吸込み量では0度以上30度までの迎角においてほぼ2.5以上の一定に近い値を示すことであり、吸込み空気量が多いほど広範囲において安定した帆特性を示すことになる。

なお、本円筒型帆の対象とする大型肥大船においては、通常の帆船とは異なり、横方向の流体抵抗が大きいことから、必ずしも揚抗比最大が運行上の最適点とはならず、最大推力という観点から迎角、空気吸込み量を考える必要がある。

4.2 多孔板型の特性

空気吸込み方式の評価のため多孔板型の試験もスリット型と同様に実施した。その揚力係数および揚抗比を Figs. 8, 9 に示す。

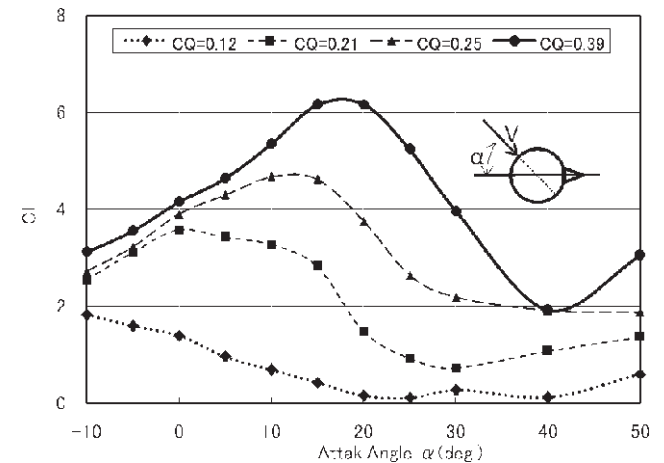


Fig. 8 Lift Coefficient of Punched Metal Type Model (J), $V=9.95\text{m/s}$

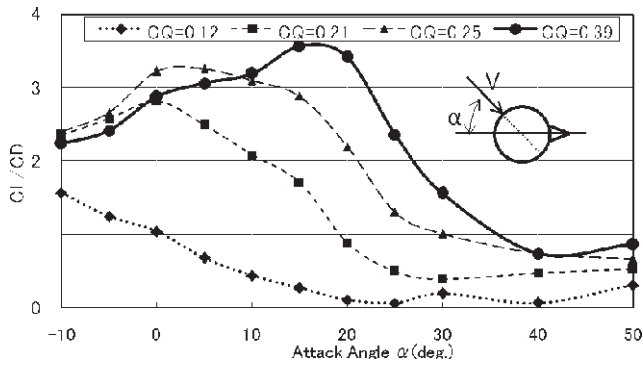


Fig. 9 Lift Drag Ratio of Punched Metal Type Model (J), $V=9.95\text{m/s}$

(1) 空気吸込み量の影響

全迎角で空気吸込み量の増加に伴い揚力が増加する傾向があり、スリット型とほぼ同じ結果を示している。迎角影響については、最大計測流量においても最大揚力は20度近傍にあり、それ以上の大迎角になると揚力係数が急激に低下するという結果であり、スリット型の最大吸込み量の場合とは大きな違いを示している。これは、スリット型では同一空気吸込みの場合でもスリット線上で集中的な吸込み作用があり、局部的に境界層を強く制御できることを示すが、多孔板型では吸込み領域全般での均一な吸込みを生じており、局部の境界層吸込み能力については小さくなる結果と考えられる。

(2) 揚抗比

多孔板の揚抗比は明らかに最大揚抗比を示す最適迎角があり、最大空気吸込み量 $C_Q=0.39$ においては15~20度の範囲である。多孔板の境界層吸込みは境界層の吸込みという面で有効であり、最大揚抗比は約3.5と大きい。迎角に関しては明確な最適点があることが分かる。これはスリット型との特性の違いである。

4.3 空気吸込み方式の比較評価

最大揚力で見ると、スリット型が約7.5、多孔板型が約6.2とスリット型のほうが大きい。また、揚抗比で見るとスリット型が2.9、多孔板型が3.6となり多孔板型のほうが大きい。しかしながら、揚力の絶対値および迎角に対する敏感さを考えると、スリット型では微妙な角度調整の必要がなく大きな揚力を得られるという実用上の適応性が優れているものと考えられる。

5. 円筒帆周りの流れ

スリット型模型 (I) と同一開口面積比をもつ直径60 mmの小型模型 (E) を用い、煙風洞にて流線観測及び円筒帆周りの流速をトーニック社製風速計プローブ (NL-70-400) にて計測した。流線観測結果を Photo 3 に、円筒

外面から10mm半径外側の位置 ($r/r_0=4/3$) における流速分布を Fig. 10 に示す。流線観測の結果では、吸込み量 $C_Q=0.35$ 、迎角30度において、円筒帆後流の流れが下側に設けたスリットからの吸込み効果により円筒帆後半部の剥離が消滅し、後端部に設けたフィンに沿い乱れない流れが実現していることが分かる。流速分布によっても円筒帆上半部 (0度-180度) は吸込みによる影響はほとんどないが、スリットのある下半部 (180度-360度) では吸込みにより剥離部の速度が大きく回復し、揚力発生メカニズムが流場の変化であることが裏付けられている。

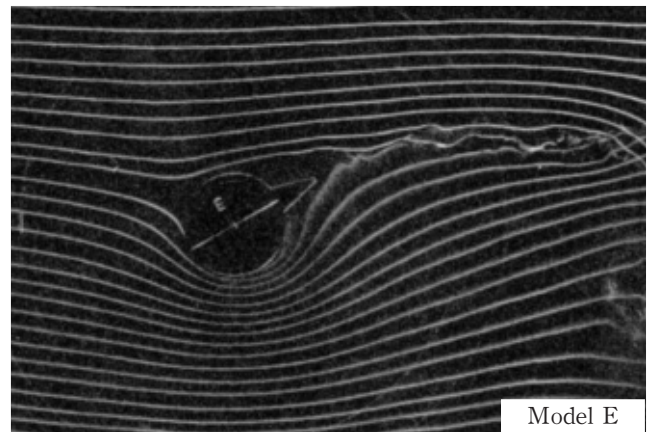


Photo 3 Stream Lines around Cylindrical Sail (Smoke Tunnel) ($\alpha=30^\circ$, $C_Q=0.35$)

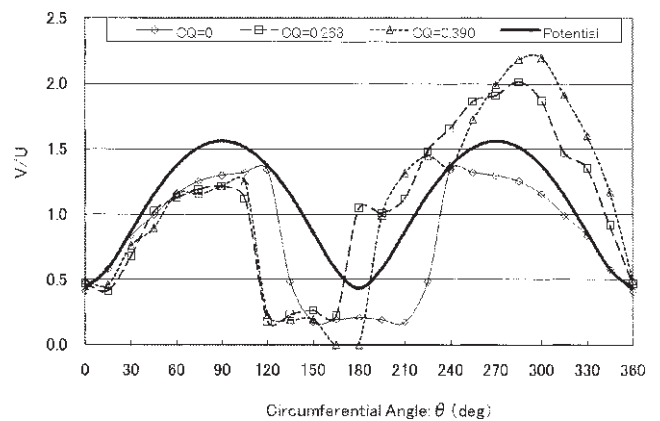


Fig. 10 Velocity Distribution Around the Circular Cylinder Model E, $r/r_0=4/3$

6. 実用化評価

上記の大型風洞試験の結果をもとに、実用化に向けた補助推進器としての性能を概略評価した。対象はスリット型とし、最大推力を与えた場合の推力を求め検討した。ドジャークは直径1m、高さ17mとした。補助推力 T は相

対風向を θ とすると、下式で与えられるものとした。

$$T = \frac{1}{2} \rho L D V^2 (C_L \sin \theta - C_D \cos \theta)$$

VLCC を想定して円筒帆角を最大揚力角度に設定できるものとして算出した推力を Fig. 11 に示す。

本図より、1本のドジャー支持構造の円筒型帆から得られる推力は相対風速により異なるが、例えば、20m/s で約 30kN、25m/s で約 50kN と推定され、推進力が平水中抵抗の約 2-3% 程度の推力を発生することとなる。さらに、前進推力を与える風向きの範囲が非常に小さな迎角でも生じることになり、その有効性が期待できる。

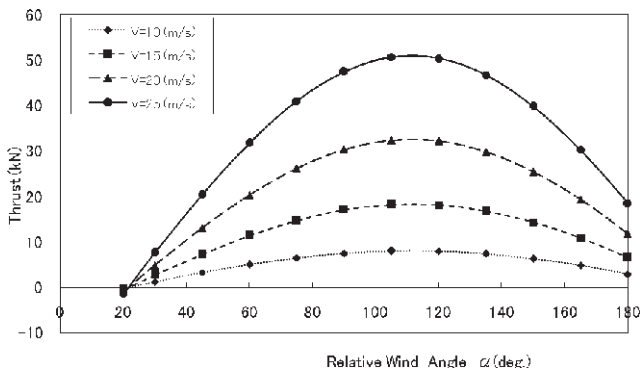


Fig. 11 Expected Thrust by Slit Type Cylindrical Sail

7. まとめ

大型船用の風力利用推進補助装置として考案した円筒型帆の概念を示し、基本特性のひとつである揚抗力について実験的な調査を実施した。その結果、下記の結論を得た。

- 1) 大型風洞において円筒型帆の空気吸込み中の揚抗力を精度よく計測できるシステムを確立し、円筒帆の揚抗力特性を定量的に評価することができた。
- 2) スリット型と多孔板型の吸込み方式の比較では、最大揚力および幅広い迎角で揚力が得られることから、スリット型のほうが実用性は高いと考えられる。
- 3) 揚力発生状態における円筒帆周りの流線および速度分布計測を行うことにより、境界層制御による揚力発生のメカニズムを明らかにした。
- 4) 最大揚力係数は約 7.5 程度が得られることが明らかになり、大型タンカーのような船型に対しては、ドジャー支持部を利用した補助推進装置として利用できる可能性を示した。

謝 辞

本研究の 1 部は科学研究費補助金 (基盤研究(C) 17560712) によるものである。また、本研究には研究当時の卒業研究および修士論文の研究を通じて本研究に参画された椎井 宰、尾崎伯哉、山崎福太郎、水野 本、深海裕司、花井 慈、菊池康裕、志村裕史の諸君に感謝をします。また、風洞実験の実施に当たり三井造船株式会社井上浩男、内藤誠両氏には風洞計測に関しご援助を得たことを記し感謝します。

参考文献

- 尾崎伯哉, 八木 光, 藤井昭彦, 松原直哉: 円筒型風力補助推進装置に関する基礎研究—その 3: 空気吸込み下の 2 次元揚抗力計測システムの開発—, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第 4 号, 2007 年 5 月, pp.349-350.
- 尾崎伯哉, 八木 光, 藤井昭彦, 松原直哉: 円筒型風力補助推進装置に関する基礎研究—その 4: 大型揚抗力計測システムの開発と円筒帆の揚抗力評価—, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第 5E 号, 2007 年 11 月, pp.147-150.
- 椎井 宰, 八木 光, 藤井昭彦, 野尻武生: 円筒型風力補助推進装置に関する基礎研究, 関西造船協会講演概要集, 第 24 号, 2005 年, pp.63-66.
- 椎井 宰, 八木 光, 藤井昭彦: 円筒型風力補助推進装置に関する基礎研究—その 2: 空気吸い込み方式と流場—, 本船舶海洋工学会講演論文集, 第 2E 号, 2006 年 5 月, pp.139-140.
- Shiiri, T., Yagi, H., Fujii, A, Wind tunnel study of column-type circular cylinder propulsion assistance system (C-PAS) for Ships, Proceedings of the Forth International Symposium on Computational Wind Engineering, July, 2006, pp.673-676,
- 船舶: 公開特許公報特開2007-45223 (2005.8.8).
- 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: 三井造船技報 NO.178, pp.132-138, 2003.
- 藤原敏文ほか: 帆装船用複合帆の空力特性, 平成15年度 (第 3 回) 海上技術安全研究所研究発表会講演集, pp.141-146, 2002 年 6 月.
- 藤原義則: 省エネ帆装商船“新愛徳丸”, 船の科学 Vol.33, No.12, pp.36-42, 1980,
- 例えば <http://www.gotsu.co.jp>: 環境: ニュース 2004.9.13.
- Charrier, B. et al.: The Foundation Cousteau and Wind Ship Propulsion 1980-85, Preceedings of the International Symposium on Wind-ship Technology, pp.39-60, 1985.
- Hoerner, S. H.: Fluid-Dynamic Lift, Hoerner Fluid Dynamics, pp.6-28, 1985.
- Schlichting, H., and Gersten, K.: Boundary Layer Theory, 8th Edition, Springer, pp.291-320, 1999.

要 旨

近年の燃料油価格の高騰により船の経済性の向上が求められている。最も直接的な方法は推進効率を向上させることであるが、それに加えて様々な省エネルギー機器を採用することも有効である。従来、各種の省エネルギー効果はあっても投資回収率の問題から実用化されていない技術も多い。しかし、燃料油の高騰により経済性が向上し省エネルギー技術が正当化される例も増えつつある。

ここでは、新たに考案した風力利用の大型船舶用の空気吸込み型の円筒帆について、その基礎的な性能の調査結果を示す。システムの構成は船橋のドジャー支持構造を円筒型とし、船内空気取り入れ口を設け、船が本来持つ空気吸込みエネルギーを用いて円筒部周りに循環を生じさせることにより揚力を発生させ、推進力として利用しようとするものである。

吸込み量や吸込み方法などに関して風洞による実験的研究を行った結果、円筒帆の発生する揚力係数は約7.5が期待でき、大型船への適用した場合の期待効果を定量的に検討し、実用化の可能性をもつことを示した。また、流向、流速分布などを調査することにより、円筒帆の揚力発生メカニズムも明らかにした。