

船舶に搭載したレンズ風車の省エネ効果調査にかか る風洞実験

松島, 啓二
九州大学応用力学研究所技術室

<https://doi.org/10.15017/1786653>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所技術職員技術レポート. 16, pp.1-4, 2015-09. Research Institute
for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

船舶に搭載したレンズ風車の省エネ効果調査にかかる風洞実験

松島 啓二

要旨

九州大学応用力学研究所風工学分野では、従来から、エコシップと総称される船舶の高効率航行について研究を行ってきた。他方では、風力エネルギーの有効利用を目的として高効率のレンズ風車開発を進めている。そこで、両者を組み合わせたレンズ風車搭載船を構想し、その省エネ効果を調査することになった。追い風時において、船舶上のレンズ風車は発電エネルギーをもたらす、さらに帆のように風圧抵抗を推進エネルギーに変える効果を持つ。向かい風時には、相対風速が増すことにより発電量は増加するが、風圧抵抗が推進を妨げるという逆効果を生じる。風向に対する船体回頭角を変化させ、風車出力と風圧抵抗を詳細に調査することで、レンズ風車を搭載することの総合的な省エネ効果を知ることができる。本稿では、レンズ風車搭載船の省エネ効果を調査するために行なった風洞実験について紹介する。

キーワード

レンズ風車・エコシップ・風力エネルギー・省エネ・風洞実験

1. はじめに

環境問題およびエネルギー問題が世界的な課題となっている一方で、新興国の経済発展に伴う国際的な物流量の増大が、輸送船による環境負荷という新たな問題を生じさせている。こうした背景から、応用力学研究所風工学分野では、エコシップと総称される船舶の高効率航行について研究を行ってきた。最初に取り組んだのは、船舶の空気抵抗を減らして、全体抵抗の減少に寄与し、遠路航海の燃料節約に供することである。このため、まず、船首を流線形にし、かつ甲板の角をとって船型に丸みを持たせて抵抗を減らした。これは1990年代の日本郵船株式会社との共同研究、引き続き2000年代の旭洋造船株式会社との共同研究の中で行なわれた。旭洋造船との共同研究は、実際の新しい船舶にまで発展し、2隻の自動車運搬船となって世界の海へデビューした。

さらに大型船のエコシップとして高効率な航海を実現するべく、より積極的なアイデアが導入されることになった。ここに説明するレンズ風車を搭載した大型船舶の提案である。風車搭載船自体はすでに実運用されているが、本提案では、従来型の船舶に集風体付きの超高効率水平軸風車であるレンズ風車を搭載する。レンズ風車は、風速に対する発電効率が秀でている反面、大きな風圧抵抗を受けるという短所を持つが、船舶においてはこれが帆としても機能すると考えられる。すなわち、追い風時に高い風圧抵抗を推進力として利用することで、主機（メインエンジン）のエネルギー消費低減と合わせて有用なエネルギー収支を得られることが期待される。一方、向かい風時には、風圧抵抗が推進力の一部を相殺するため、かえって高効率化を妨げてしまう。レンズ風車搭載船の最適な形態や運用方法を見出すためには、各相対風向に対して船舶全体にかかる風圧抵抗と風車の発電出力を詳細に調査する必要がある。

今回、船舶およびレンズ風車の模型を用いた風洞実験を行ない、レンズ風車搭載船の省エネ効果を調査したので、ここに報告する。

2. 風洞実験

本実験の目的は、レンズ風車搭載船に関して、風車付近の風速分布、船舶全体にかかる風圧抵抗および風車出力を調査することである。風圧抵抗については前後力係数 C_x を求め、風車出力については出力係数 C_w を求める。 C_x は物体の大きさや風速に対してどの程度の風圧抵抗が発生するかを示す係数であり、 C_w は風車の大きさや風速に対してどの程度の風車出力が得られるかを示すものである。 F_x : 船体の前後方向にかかる力[N]、 P : 風車出力[W]、 ρ : 大気密度[kg/m³]、 U : 近寄り風速[m/s]、 A : 船体の正面投影面積[m²]、 A' : ロータ面積[m²]とすると、 C_x 、 C_w は、それぞれ以下のように定義される。

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (1)$$

$$C_w = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^3 A'} \quad (2)$$

2-1. 風洞設備ならびに測定機器

風洞設備としては、九州大学応用力学研究所が備える大型境界層風洞（最大風速 30m/s、測定部サイズ：幅 3.6m、高さ 2m、長さ 15m）を用いた。測定機器については、表 1 に示す。

表 1. 測定機器

機器	メーカー	型番
三分力計	日章電機	LMC-3501-5
直流型歪増幅器	日章電機	DSA-100
電圧計	東陽テクニカ	2000MULTIMETER
熱線流速計	日本カノマックス	7000
固定抵抗	FOX	RWH500G
電流計	三和電気計器	PC500a/PC510a
回転計	小野測器	HT-5500

2-2. 船舶模型ならびに風車模型

船舶模型としては、現行船（平均的な自動車運搬船として総トン数 43,900t、主機出力 10,115kW の SEBRING EXPRESS を想定）を模した模型を用いた。船上構造物は省略している。風車模型には、CiE10^[1]と呼んでいる型の集風体を装着した模型を用いた。ロータ径 D=300mm、集風体外径は 380mm である。なお、風車は、回路抵抗を調整することで常に最適制御（風車出力係数 C_w が最大になるように周速比 $\lambda = \text{翼端速度}[\text{m/s}] / \text{風速}[\text{m/s}]$ を最適化）を行なっている。模型の主な実寸を図 1 に示す。いずれも想定した実物の 1/100 スケールである。

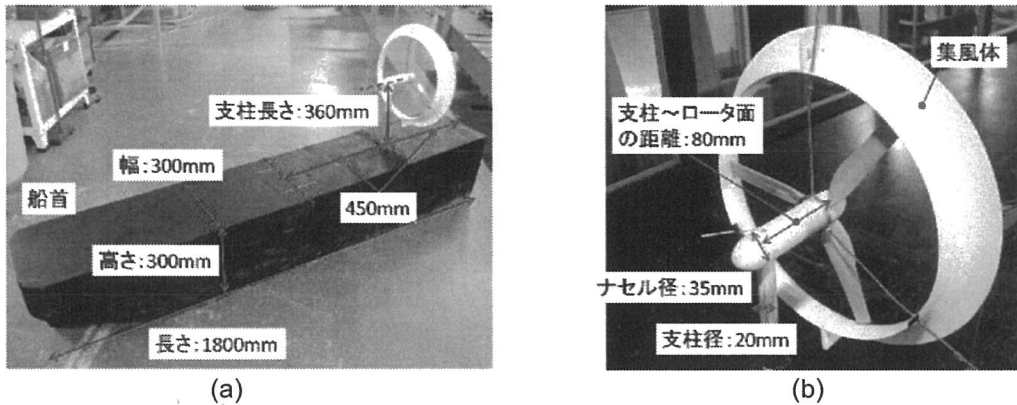


図 1. 船舶模型(a)ならびに風車模型(b)

2-3. 実験環境ならびに実験条件

実験では、風洞測定部に境界層調節台を固定し、船舶模型を境界層調整台の上に台から 5mm 程度の隙間を開けて設置した（図 2）。船体は、船体中心点（風車の支柱位置から船首側へ 450mm）にて、台下から台上に突き出した三分力計に固定されている。風洞床には細かな凹凸があり、流入風が床面付近で異なる流れの層（境界層）を形成する可能性がある。境界層調節台の役割は、境界層形成を抑制して模型を一様な流れの中に置くことである。実験条件は、流入風速：5.2m/s、風車ヨー角度：0°（常に風に正対）、計測時間：30 秒、サンプリング周期：0.001 秒、基準面積（船体正面）：0.09m²とした。

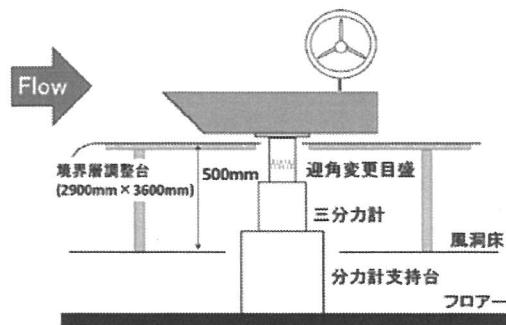


図 2. 実験環境の模式図

2-4. 実験方法

空間固定座標における風上方向を x 軸の正、風上から見て左方を y 軸の正、鉛直上向きを z 軸の正とする。甲板面を z 軸の 0 とし、風速分布測定ではロータ面中心を x・y 軸の 0、力の測定では船体中心を x・y 軸の 0 とする。三分力計が計測するのは、主流方向の抗力 f_x [N]、それに直交する水平力（揚力） f_y [N]、回頭モーメント N [Nm] である。船体固定座標における船首方向の力を前後力 F_x [N]、それに直行する水平力を横力 F_y [N] とする。図 3 に座標系を示す。

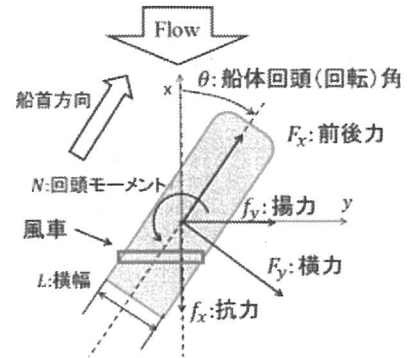


図 3. 座標系 (z 方向正から見た図)

(1) 風速分布

船舶のみを設置し、風車設置位置およびその周辺の風速分布を、船体を 0~180°まで 45°間隔で回頭させながら、熱線流速計（表 1）にて測定した。

(2) 前後力、横力、回頭モーメント、風車出力

船体を 0~360°回転させ（10~15°間隔）、現行船のみ、現行船+風車（無回転）および現行船+風車（稼働）の各場合において、船舶全体にかかる前後力、横力、回頭モーメントおよび風車出力 P [W] を計測し、各種係数を求めた。なお、風車模型は発電機を備えており、図 4 の回路を構成して電圧値・電流値から風車出力を求めている。風車ナセル高さは 0.9D（低）、1.2D（高）の 2 パターンとした。

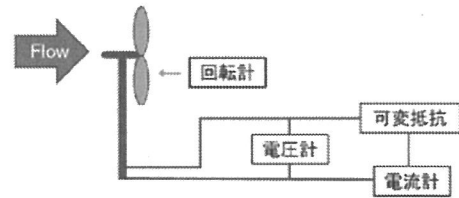


図 4. 風車出力回路

3. 実験結果

(1) 風速分布

図 5 に、測定位置 $(x, y) = (0D, 0D)$ における主風向風速 u の z 方向における分布を示す。風速 u を U : 流入風速で、高さ z を D : ロータ径で無次元化している。

結果より、甲板上に低速の層が形成されており、船体による剥離流れが発生していることが分かる。回頭角 45°、90°、135° および 180°においては、ロータ高さ付近で剥離流れの影響によると思われる増速が認められる。90°における増速が最も大きいのは、風が船体の長辺（側面）に垂直に当たることにより、広い範囲で強い剥離が起り、かつ測定位置が風上側の甲板端に近いために剥離流の影響をより多く受けたためと考えられる。45°は 135°に比べて、剥離によって減速している層の厚みが若干大きい。船体の測定位置より上流にあたる部分は、45°の方が大きいと、斜めに風が当たるとき、船体上流部分が流れに及ぼす影響は、下流部分の剥離を厚くする効果を持つと推測される。

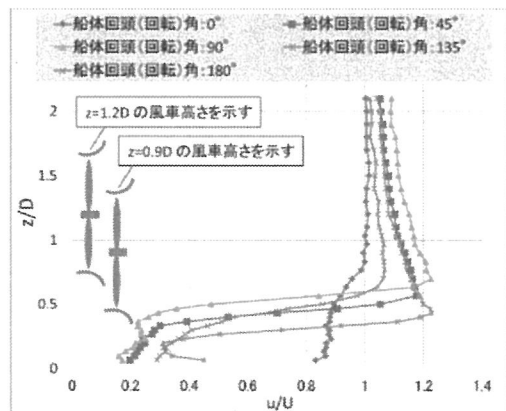


図 5. 主風向風速 u の z 方向分布

(2) 前後力、風車出力

風向に対する各船体回頭（回転）角における前後力係数 C_x の結果を図 6 に示す。また、風向に対する各船体回頭（回転）角における風車出力係数 C_w の結果を図 7 に示す。 C_x の絶対値は、風向が船体の前後方向（0°、180°）にあるとき最も大きく、横風（90°、270°）に近づくほど減少している。追い風時（90~270°）には、風圧抵抗が推力に対してプラスに作用することが分かる。また、風車の高さによる差異はほとんど見られない。風車出力係数 C_w に関しては、回頭角によって 1.3 倍程度の差が生じている。また、風車の z 位置が高い方（ $z=1.2D$ ）が良好な結果となっている。風車高さによる差は、図 5 に示した船体による剥離流れがもたらす増速効果によるところが大きいと考えられる。なお、回頭角 180°を中心とした対称性が一部崩れている。

るのは、風洞の流れに左右の偏りがある、または模型の手作り部分に歪があることが原因と思われる。力と風車出力を 360°測定して偏りや歪を見た結果、風速分布に無視できない影響を与える程ではないと判断したので、180°以降の風速分布測定は行っていない。

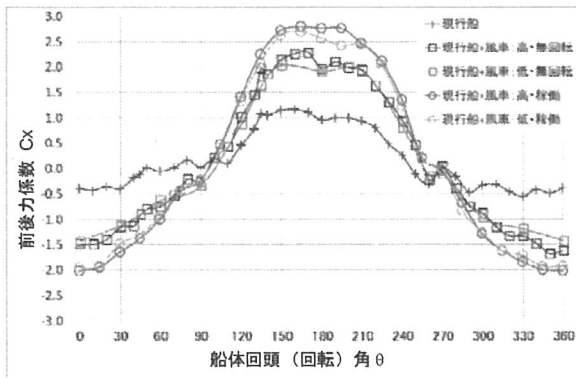


図 6. 前後力係数

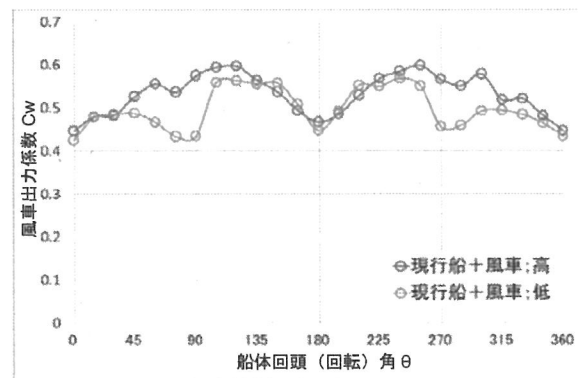


図 7. 風車出力係数

4. まとめ

模型を用いた風洞実験により、レンズ風車を搭載した船舶における風速分布、風圧抵抗、風車出力を測定した。船体回頭角によって船体にかかる前後力、風車出力は大きな影響を受けている。各船体回頭角における前後力係数、風車出力係数を求めることができたので、海上の風況データがあれば、これらの係数を用いて実際の船舶が航行する際におけるエネルギー収支（風車による発電量+風圧抵抗による主機のエネルギー消費変化量）を導出することが可能になった。

図 8 は北海における自動車運搬船の航路（イギリス・サンダーランド → ロシア・サンクトペテルブルク）

におけるエネルギー収支を試算し、相対風向ごとに示したグラフである。追い風（90°～270°）が吹けば正の収支となるが、向かい風では風圧抵抗による損失が大きく影響して負の収支になっている。全ての相対風向における収支を単純に合算すればマイナスになるが、可倒式の風車を用いて風車が向かい風を受けない運用をとれば（収支が正になる相対風向のみを合算でき）、同規模の船舶における主機消費エネルギー^[2]の約 1% にあたる 2000kWh/day のプラスとなる。このことから、レンズ風車搭載船においては、追い風を多く利用し、向かい風に対策をとることが重要と分かる。

今後は、航路の選定による効果の試算、向かい風対策の検討、風車の増設等による影響の実験的検証を行ない、レンズ風車搭載船の高効率化を追求する予定である。

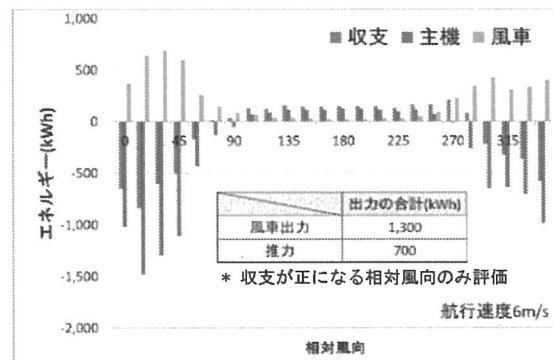


図 8. 1日におけるエネルギー収支（期待値）

参考文献

- [1] Y.Ohya, T.Karasudani: Energies, 3(4), 634-649, 2010.
- [2] 平岡克英, 亀山道弘, 福元正明: 独立行政法人 海上技術安全研究所 第 3 回研究発表会講演集, 365-368, 2003.
- [3] 松島啓二, 吉澤壮, 大屋裕二, 烏谷隆: 風工学シンポジウム論文集, 第 23 回, 115-120, 2014.

謝辞

実験の遂行、結果の考察および本稿の作成に当たり、九州大学応用力学研究所の大屋裕二教授、烏谷隆准教授、渡邊公彦氏から多くのご教示・ご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。