

船舶のエネルギー収支に対する水平軸風車 ならびにセクターマネジメントの効果

Effects of Horizontal Axis Wind Turbine and Its Sector Management on the Energy Balance of a Vessel

吉田 茂雄¹ 吉澤 壮² 松島 啓二³
Shigeo YOSHIDA So YOSHIZAWA Keiji MATSUSHIMA
烏谷 隆³ 大屋 裕二³
Takashi KARASUDANI Yuji OHYA

Abstract

The improvement of the energy balance of a transport vessel by a wind turbine and application of sector management were investigated. The assumed wind turbine has a 30m rotor diameter, which is equal to the width of the vessel. Directional characteristics of the wind turbine installed vessel were measured in a wind tunnel test. Power loss due to the wind turbine drag force was shown to exceed power production in certain combinations of relative wind speed and direction. The case study was conducted for the North Sea route between Sunderland and Saint Petersburg. It shows that the wind turbine is more effective to improve energy balances by following the wind and lower vessel speed. Furthermore, the sector management, which selects power production or idling based on power balance, was also shown to improve 20% of the energy balance in case of 6m/s of vessel speed. Thus, the wind turbine and its sector management were shown to be effective to improve the energy balance of the vessel.

キーワード：風車，船舶，エネルギー収支

Keywords: Wind Turbine, Vessel, Energy Balance

1. 緒言

今日，地球温暖化をはじめとした環境対応とエネルギーの安定的な供給確保が世界的に重要な課題である。

輸送部門において，船舶は輸送量単位あたりのCO₂排出量，エネルギー効率ともに優れた高い輸送手段である。しかし，新興国の経済発展等による国際物流の増加を鑑み，近年，多様なエコシップが考案・研究されてきている^{1),2),3)}。

一方，エネルギー部門においては，環境負荷の低い再生可能エネルギーの利用拡大が重要な課題となっている。その中でも風力発電は規模，ならびに，コストの面で優れ，最も導入の進んでいる技術の一つである。

風車の船舶への導入に関しては，小型の垂直軸風車の運航例⁴⁾がみられるが，比較的大型の風車を搭載した例は見られない。研究としては，ディフュー

ザ付の水平軸風車を搭載した輸送船に関して風洞試験，数値流体計算（CFD），ならびに経済性計算を行い，一定の効果を確認した例がある⁵⁾。

一定の速度で航行する船舶に風車を搭載した場合，船舶のパワー収支に対する風車の効果は，風車によられる電力と風車が発生する抗力により船舶が消費するパワーが増減の和により求められ，エネルギー収支は，その時間積分により求められる。

通常の風車は，カットインからカットアウトの風速範囲で発電するように運用されている。セクターマネジメントは，ウィンドファームにおいて風車疲労や出力を勘案して，個別の風車に対して，方位ごとに異なる運転風速条件で運用する技術として知られている。本研究においては，風車が発電できる条件であっても，待機させた方が，風車を搭載した船舶のエネルギー収支が高い場合には待機させることとした。

本研究では43,000t，主機出力10,115kWの自動車輸送船⁶⁾について，水平軸風車搭載によるエネルギー収支を以下の手順で求めた。

まず，船舶に風車を搭載した場合の相対風向と風車出力の特性を風洞試験で計測し，相対風向に対す

*1 九州大学 応用力学研究所 教授
(〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1)
e-mail: yoshidas@riam.kyushu-u.ac.jp

*2 千代田化工建設

*3 九州大学 応用力学研究所
(原稿受付：2014年3月6日)

る風速増加率を求めた。次に相対風速・風向に対する風車を搭載した船舶のパワー収支の特性を、一定速度で航行する場合について求めた。続いて、北欧の北海航路を例に、対象とする船舶の相対風速・風向の出現確率、ならびに、風車搭載によるエネルギー収支を評価した。さらに、通常運転時とセクターマネジメント適用時について比較を行い、その有効性について評価した。

2. 風洞試験

2.1 風洞試験概要

1/100 スケール模型の風洞試験により、船舶上に設置した風車における相対風向に対する風速の増速率を計測した。

2.2 供試体概要

模型の概要を図 1（図左方が船首）ならびに図 2 に示す。本模型では、船上の構造物である居住区やファンネル（煙突）は省略し、フラットな甲板を想定した。なお、本風洞試験においてはディフューザ付の風車を想定し、設置位置は船尾と船体中央部の中間とした。

風車はロータ直径が 300mm、ハブ高さが 380mm（実機スケールで各々30m, 38m）である。なお、本模型は DC 負荷により回転速度を調整することができ、各計測条件において最も高効率になるロータ速度を設定した。

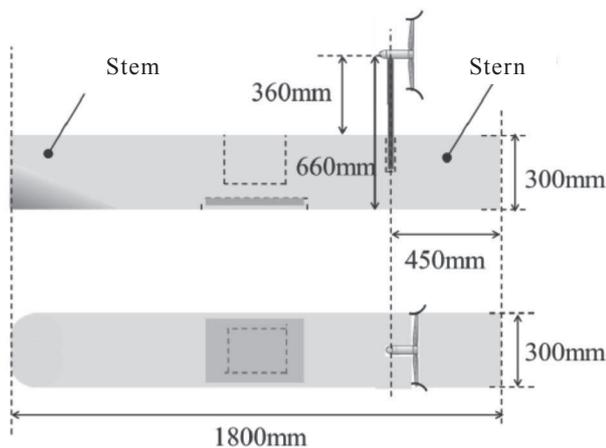


Fig 1 1/100 Scale Model Outline
(Top: Side View, Bottom: Top View)

図 1 1/100 スケールモデル概要
(上段：側面図，下段：上面図)

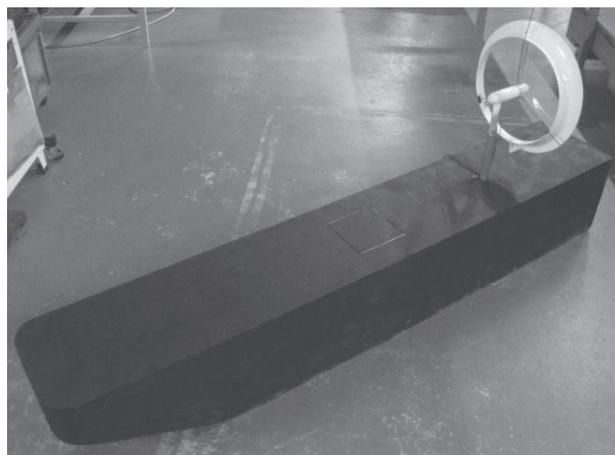


Fig 2 1/100 Scale Model

図 2 1/100 スケールモデル外観

2.3 試験設備

2.3.1 風洞

風洞試験には、九州大学応用力学研究所の大型境界層風洞を使用した。同風洞は、幅 3.6m×高さ 2.0m×長さ 15m の測定部を持ち、最大風速 30m/s まで計測可能である。

2.3.2 計測システム

本試験に使用した主要な計測装置を表 1 に示す。後述する各試験条件においてサンプリング周期 0.001s で、20s 間測定した。

Table 1 Measurement System

表 1 計測システム

Equipment	Maker	Type
3-Axis Balance	Nissho	LMC-3051-5
Strain DC Amp	Nissho	DSA-100
Voltmeter	Toyo	200 Multimeter
Hot Wire Anemometer	Kanomax	7000

2.4 試験条件

風洞試験は以下の条件の全ての組み合わせで行った。なお、発電時の回転速度は最大効率点（一定値）に設定した。なお、相対風向 0deg は、船首方向からの風を指す。

- ・ 供試体：風車搭載船舶，風車単独（船舶なし）
- ・ 風速：5m/s
- ・ 相対風向：0deg～180deg（各 15deg）
- ・ 運転条件：発電（最大効率），待機（ロータ固定）

2.5 計測結果

2.5.1 風車位置における風速分布

風車位置における代表的な相対風向の風速分布を図3に示す。図中の実線はハブ高さ（360mm）、破線がロータの上下端の高さを示す。

風速の増加率は相対風向 90deg において最も高い。この角度では、流れの二次元性が比較的高く、船舶の側縁で増速した流れを、風車の位置において良く捉えられるためである。相対風向 180deg では船舶の幅が狭く、船尾からの距離が長いので、90deg の場合よりも増速率は低い。また、相対風向 0deg の場合は、船首の形状が風速の増加にほとんど寄与せず、加えて、船首からの距離もさらに長いので、風速の増加は小さい。

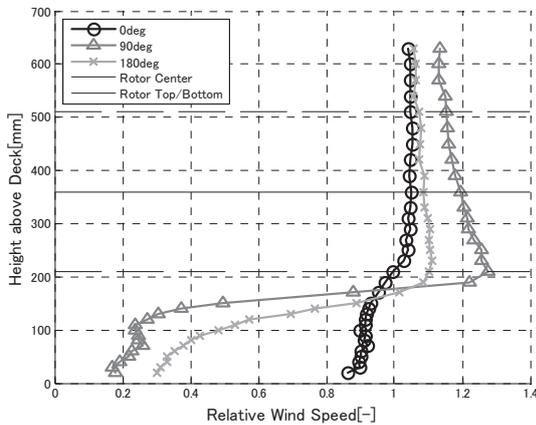


Fig 3 Wind Profile
in Typical Relative Wind Directions

図3 代表的な相対風向に対する風速プロファイル

2.5.2 相対風向に対する出力比

風車単独での出力に対する、船舶上に設置したハブ高さ 360mm（実機 36m 相当）の風車の出力の比を図4に示す。船舶上に設置する場合、いずれの相対風向においても風車単独より高い出力が得られている。なお、ピーク値（約 1.8）は 120deg 付近に見られ、0deg と 180deg で概ね 1.3~1.4 の値を示している。

参考として、図4にハブ高さ 270mm（実機 27m 相当）における計測値も併記する。図3において、ロータよりも低い位置で相対風向 90deg における風速が急激に低下しているのを示したが、出力比においても、これを裏付ける結果が得られた。ここで想定しているサイズの船舶と風車において、270mm のハブ高さは不十分と考えられる。

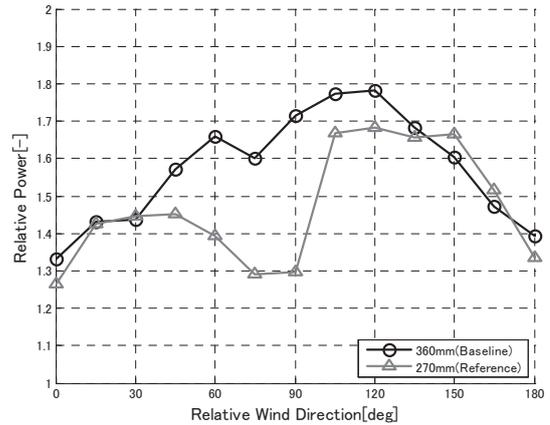


Fig 4 Relative Power to Relative Wind Direction

図4 相対風向に対する出力比

2.5.3 相対風向に対する風速比

前項に示した出力比は、最大効率点（効率一定）におけるものである。この条件においては風車出力が風速の3乗に比例するため、図4に示した出力増加率の1/3乗から風速比（風速増加率）を計算した、風車に流入する風速比を図5に示す。

なお、前項で述べたとおり、ハブ高さ 270mm では、相対風向 45~125deg において、風速比が著しく低下している。

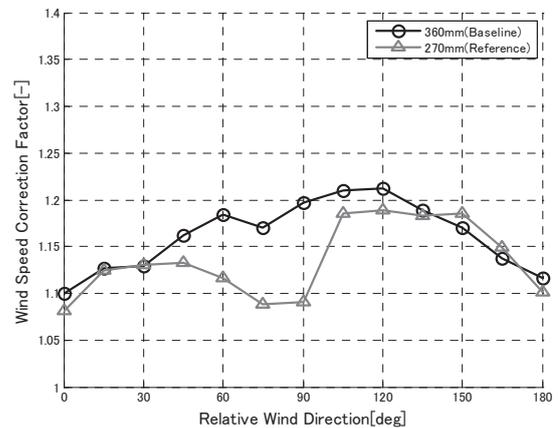


Fig 5 Relative Wind Speed to Relative Wind Direction

図5 相対風向に対する風速比

3. エネルギー収支計算

3.1 計算の概要

一定速度で航行する船舶に風車を搭載した場合、発電によりパワーを取得すると同時に、抗力により船舶の消費パワーを増減させる。本章では、具体的なケースを想定し、風車の出力ならびに船舶の消費パワーの増減量を計算し、風車を搭載した場合のエ

エネルギー収支の検討を行った。

なお、2章で述べたように、風洞試験模型は実機に対して1/100と小さいため、実機と同様の出力係数(効率)や抗力係数を得ることはできない。また、追い風が顕著な場合などを除いて、一般には、抗力の小さい風車が望ましい。以上を鑑み、本検討では、抗力が比較的小さいディフューザなしの風車を想定した。なお、船舶に対する風車のサイズならびにロータ位置が同等であるため、本検討では図5の風速比を適用した。

3.2 解析モデル

3.2.1 船舶

本検討では実スケールの自動車輸送船⁶⁾を想定した。また、航行速度は6m/sを基本としたが、一部、比較用に8m/sについても計算した。

3.2.2 風車

本検討では、一般的なディフューザなしの可変速・ピッチ制御の風車を想定した。風車の主要諸元は、NEDO 離島用風力発電プロジェクトで開発した100kW風車⁷⁾のロータ直径を22mから30mに拡幅し、ハブ高さは風洞試験のスケール比に合わせた。また、タワー直径は基部で2.3m、頂部で1.5mの直線テーパを想定した。

風車の性能・荷重の解析にはBLADED⁸⁾を使用した。これは、空力特性に翼素運動量理論を採用し、条件に応じた風車の制御も考慮している。

風速に対する出力ならびにタワー基部せん断力を図6ならびに図7に示す。タワー基部せん断力は定格風速付近でピーク値を示している。定格風速から高風速側では一旦低下傾向となり、さらに高い風速域では、タワーの抗力が動圧に比例して増加するため、全体として増加傾向に転じる。

図6ならびに図7に、セクターマネジメントの解析用に待機時(Idling)の解析結果も併記する。この状態では、出力はゼロとなるが、荷重は風速の2乗に比例して増加するため、荷重は発電時よりも大幅に低下する。

なお、カットイン風速(3m/s)からカットアウト風速(25m/s)の風速範囲外では風車は停止させる。

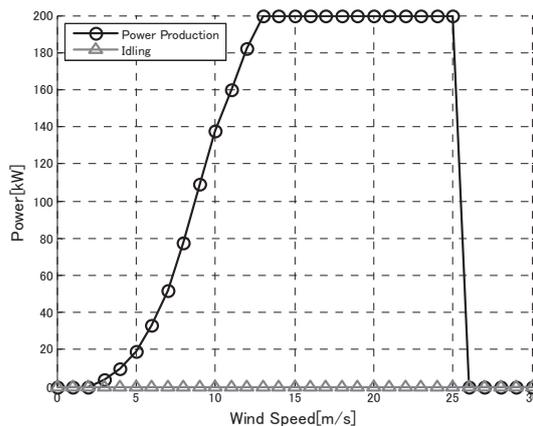


Fig 6 Wind Turbine Power to Wind Speed

図6 風速に対する風車出力

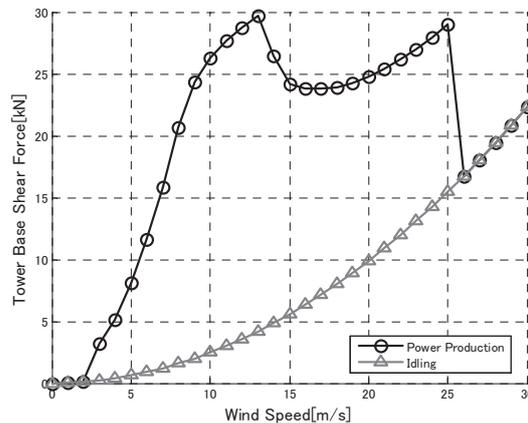


Fig 7 Tower Base Shear Force to Wind Speed

図7 風速に対するタワー基部せん断力

3.3 解析方法

3.3.1 船舶に対する相対風向・相対風速

船舶ならびに風車の座標系を図8に示す。風速 V_0 の海域を速度 V_r で航行する船舶は、相対風向 $\Delta \psi$ から、相対風速 V の風を受ける。

3.3.2 風車に対する相対風速・相対風向

3.1節で述べたように、本検討では図5に示した方位別の風速比により、船舶に対する相対風速から風車ハブ中心の相対風速を計算した。また、風車の運転状態(発電、待機)にかかわらず、風車は常時、相対風向に追従することとした。

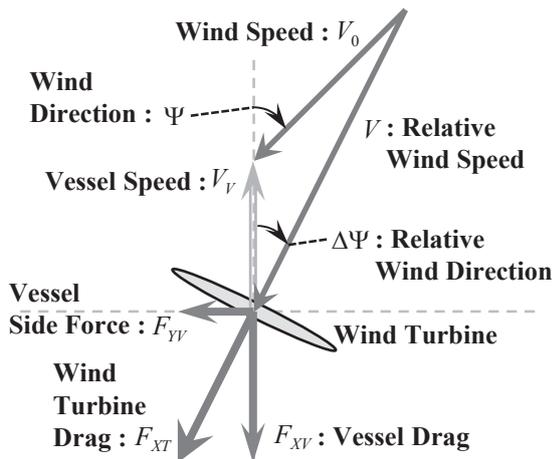


Fig 8 Coordinated Systems
図 8 座標系

3.3.3 船舶の消費パワー増加量

風車が発生する抗力 F_{XT} により，船舶の進行方向の抗力が ΔF_{XV} 増加する．船舶を一定速度 V_V で航行させる場合，船舶の出力増加量 P_V は次式で求められる．

$$P_V = \frac{\Delta F_{XV} \cdot V_V}{\eta_V} \quad (1)$$

ここで，

V_V : 船舶の航行速度．

ΔF_{XV} : 風車搭載による船舶抗力の増加分．

$$\Delta F_{XV} = F_{XT} \cos \Delta\Psi \quad (2)$$

η_V : 船舶の推進効率．

$$\eta_V = \eta_T \eta_P \eta_R \eta_H = 0.78 \quad (3)$$

- $\eta_T = 0.97$: 伝達効率．
- $\eta_P = 0.7$: プロペラ効率．
- $\eta_R = 1.04$: プロペラ効率比．
- $\eta_H = 1.11$: 船殻効率．

なお， P_V ならびに F_{XV} は，風車に作用する抗力が船舶の抗力を増加させる場合にプラス，減少させる場合にマイナスの符号をとる．

3.3.4 風車搭載による船舶のパワー収支

前項で示した計算法により風車搭載による船舶のパワー収支を計算した．なお，これを時間で積分したものがエネルギー収支となる．

相対風向，ならびに，相対風速に対する風車搭載による船舶のパワー収支を図 9 に示す．風車抗力の影響で，相対的な風を船首側から受ける場合にはマ

イナス側に，船尾側から受ける場合にはプラス側に変化する．たとえば，風車単独で 200kW の出力が得られる相対風速 13m/s における収支は，船尾から（相対風向 180deg）の風に対しては 250kW 改善するのに対して，船首から（相対風向 0deg）の風に対しては約 25kW の改善に止まる．

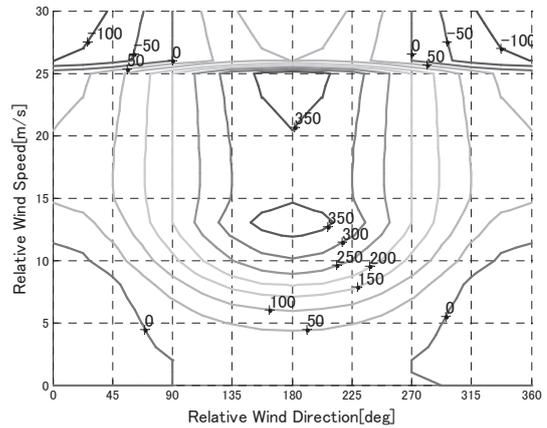


Fig 9 Power Balance in Power Production [kW] to Relative Wind Speed and Direction
図 9 発電時の相対風速・風向に対するパワー収支[kW]

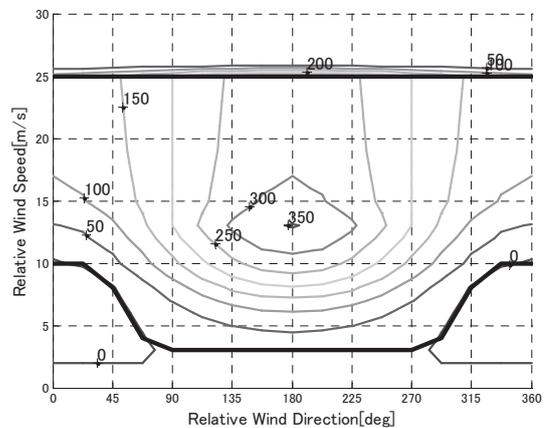


Fig 10 Power Balance Derivative [kW] of Power Production from Idling with Respect to Relative Wind Speed and Direction
図 10 待機時に対する発電時の相対風速・風向に対するパワー収支の差[kW]

風車の待機状態と発電状態では風車出力とともに船舶の消費パワーが変化する．風車待機状態に対する発電状態における船舶のパワー収支の変化を図 10 に示す．船尾から（相対風向 180deg）風を受ける場合には発電状態では発電による電力に加えて，風車の抗力増加が船舶航行を補助するため，全体とし

てプラス側に変化する．特に，図 7 に示した風車の荷重が高くなる 10～15m/s 付近においてピークがみられる．一方，船首から（相対風向 0deg）の低風速の風では，発電量の増加よりも抗力増加によるロスが大きくなり，風車を停止させた方がエネルギー収支は改善する．しかし，船首からの風でも高風速域においては，定格出力を維持しながらロータスラストが低下するため，発電時の方が収支はプラスになっている．

3.4 解析条件

3.4.1 航路・航行速度

本検討では，図 11 に示すイギリスの Sunderland とロシアの Saint Petersburg 間の北海航路（片道 1,250km，往復 2,500km）を想定した．なお，実際の航路は Cattegat 海峡付近で大きく湾曲しているが，往路は東北東（ENE），復路は西南西（WSW）の直線的な航路に簡略化して評価した．

また，通年のエネルギー収支計算において，距離と速度から求められる時間に加えて，荷積みと荷卸しの所要時間として，各 1 日を想定した．

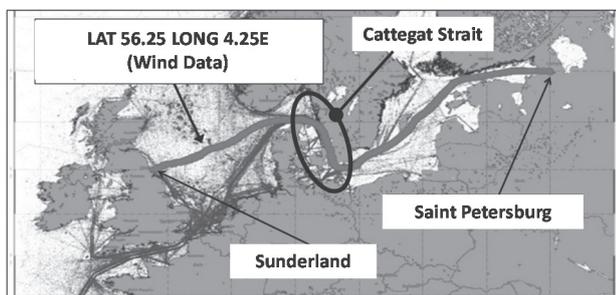


Fig 11 Rout in the Case Study

図 11 ケーススタディにおける想定航路

3.4.2 風車制御

通常運転時では相対風向にかかわらず，カットインからカットアウトの風速範囲で発電することとした．また，セクターマネジメントのケースでは，風車を停止させることにより船舶のパワー収支が改善する条件では，風車を停止させることとした．相対風向ごとのセクターマネジメントの条件を図 10 に太線で示す．通常運用時には 3～25m/s で発電するが，セクターマネジメントの発電状態は，たとえば，相対風向 0deg では 10～25m/s，相対風向 45deg では 8～25m/s などとする．

3.4.3 風況

本解析に使用した風況データの方位別の出現確率

と平均風速の分布を図 12 に示す．これは，アメリカの地球観測衛星 QuickACAT（Quick Scatterometer）によって計測された，図 11 中の“Wind Data”で示す参照地点（北緯 56.25deg，東経 4.25deg）における日平均のデータ（計 3750 点）で，計測期間は 1999 年 8 月～2009 年 11 月の約 10 年間である⁹⁾．なお，このデータは，マイクロウェーブレーダにより，海面上 10m の風速を測定したもので，水平方向の解像度は，緯度・経度ともに 0.25deg である．なお，本研究において，海面上の高さ方向の風速分布は無視した．

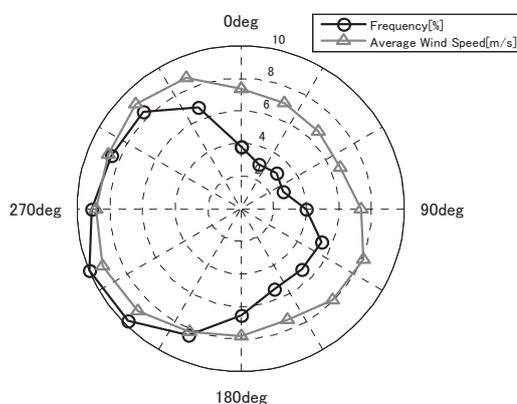


Fig 12 Wind Directional Distributions of Frequency [%] and Average Wind Speed [m/s] at the Reference Point (0deg: North)

図 12 参照地点における出現確率[%]と平均風速[m/s]の風向別分布（0deg：北）

3.5 解析結果

3.5.1 相対風速・相対風向

図 8 に示したように，相対風速と相対風向は風況と船舶の航行速度により変化する．往路（東北東；ENE）と復路（西南西；WSW）における相対風向に対する出現確率と平均風速の分布を図 13 に示す．なお，船舶に対する相対風向 0deg は船首方向を，180deg は船尾方向を指す．

図 12 に示したように，当該航路では東北東を中心とした風の頻度が低く，西南西を中心とした風の頻度が高い．そのため，船首からの風である相対風向 0deg 付近の風の頻度は，往路（東北東；ENE）で比較的低く，復路（西南西；WSW）で比較的高くなっている．

方位別の平均風速に関しても，東北東を中心に低く，西南西を中心に高くなっているため，相対風速の平均値も，往路（東北東；ENE）で低く復路（西

南西；SWS) で高くなっている。

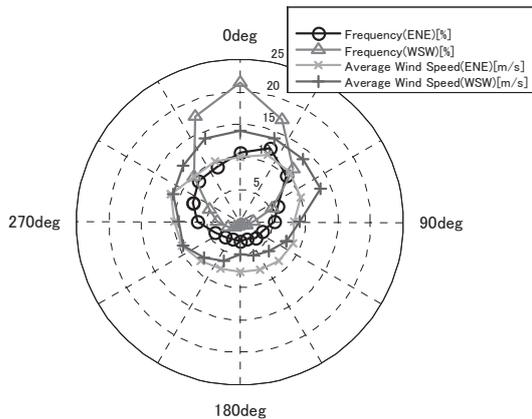


Fig 13 Time Frequency Distribution of Relative Wind Speed and Direction

図 13 相対風速・風向の出現確率密度分布

3.5.2 通常運転時

通常運転時の方位別の年平均パワー収支を図 14 に示す。結果は、相対風速・相対風向の解析結果に対応しており、0deg 付近では平均出力は高いがパワーロスも大きく、合計ではマイナスになっている。また、180deg 付近では平均出力が低い反面、抗力が推力として寄与しているため、年平均パワー収支はプラスになっている。

参考として、同図に航行速度 8m/s における解析結果を併記する。全般的な傾向は 6m/s の場合と同様であるが、全体的に収支は悪化している。これは、風車抵抗が船舶のパワー消費にネガティブに作用する場合には相対風速が高く、ポジティブに作用する場合には相対風速が低くなるためである。

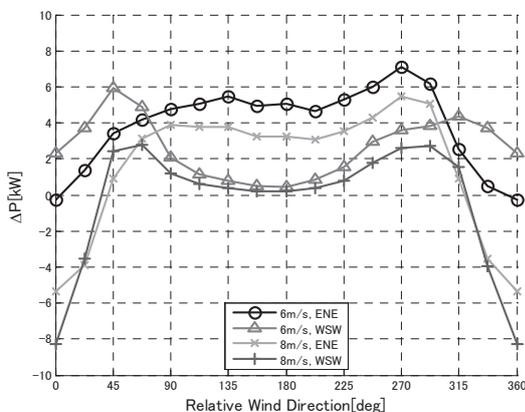


Fig 14 Annual Average Power Balance to Relative Wind Direction in Nominal Operation

図 14 通常運転時の相対風向に対するパワー収支の年平均値

3.5.3 セクターマネジメント適用時

3.4.2 項で説明したセクターマネジメントを適用した場合の年平均パワー収支を図 15 に示す。前項の通常運転時と比較して、特に 0deg 付近において改善が見られる。図 13 に示したように、船舶が前進することにより 0deg (船首) 方向で風速の出現確率、ならびに、平均風速が高くなる傾向があるため、この影響が大きくなっている。

参考で併記した航行速度 8m/s の結果は、前節と同様であり、6m/s 場合よりも年平均パワー収支は悪化している。

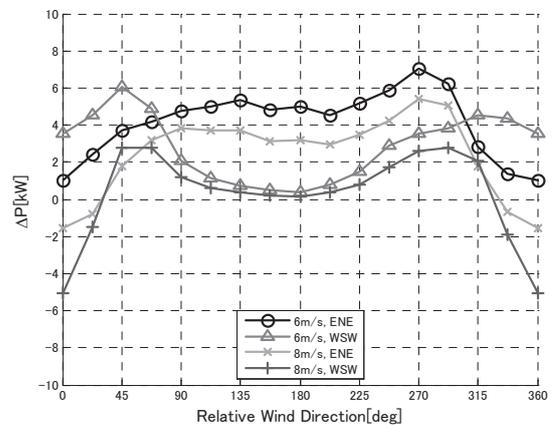


Fig 15 Annual Average Power Balance to Relative Wind Direction in Sector Management

図 15 セクターマネジメント時の相対風向に対するパワー収支の年平均値

3.5.4 風車を搭載した船舶の年間エネルギー収支

図 14 と図 15 により計算した往路(東北東;ENE)、復路(西南西;WSW)、ならびに往復(Total)の年間のエネルギー収支を表 2 に示す。これらのデータは、風車を搭載したことによる船舶の年間エネルギー収支を年間時間と風車の定格出力の積で標準化したものであり、風車単独の場合の設備利用率に相当する量である。ここで、Availability (利用可能率) は距離、航行速度、ならびに、荷積みと荷下しに各 1 日を想定した際の総時間に対する風車の運転時間の比率を示す。

往路(東北東;ENE)に対して、復路(西南西;WSW)では、発電量が大幅に増加する一方で、風車抗力増加によるエネルギーロスが 2 倍以上増加し、全体の収支が低くなっている。

セクターマネジメント適用時(S.M.)では、通常運転時(Nom)に対して、発電量は 8.9%低下してい

るが（表中 0.912），抗力の低下によりエネルギーロスが 19.7%低下し（表中 0.803），全体の収支は 19.8%改善している（表中 1.198）。

全体として，風車を設置することにより，通常運転時（Nom.）で風車定格出力の 12.2%，セクターマネジメント適用時（S.M.）で同じく 14.6%に相当するエネルギー収支の改善が確認された（表中 Total の Total）。

Table 2 Energy Balance in 6m/s of Vessel Speed

表 2 航行速度 6m/s におけるエネルギー収支

Operation Mode		Nom.	S.M.	S.M./Nom.
Availability		0.707	0.707	1.000
Specific Energy Production	ENE	0.387	0.353	0.911
	WSW	0.497	0.453	0.913
	Total	0.442	0.403	0.912
Specific Energy Loss	ENE	-0.196	-0.138	0.702
	WSW	-0.444	-0.376	0.847
	Total	-0.320	-0.257	0.803
Total[-]	ENE	0.191	0.215	1.126
	WSW	0.053	0.078	1.460
	Total	0.122	0.146	1.198

4. 結言

本研究では，以下の手順により，風車を搭載した船舶のエネルギー収支に対する風車ならびに風車のセクターマネジメントの効果を評価した。

- ・船舶を搭載した船舶の風洞試験を行い，相対風向に対する風速増加率を求めた。
- ・この風速増速率を勘案して，風車を搭載した風車の一定速度航行時の相対風速・風向に対するパワー収支を求めた。
- ・北海航路を例に，通常運転時とセクターマネジメント適用時のエネルギー収支を計算した。

その結果，以下を明らかにした。

- ・風洞試験の結果，すべての風向において，風車単体の場合よりも風車位置での相対風速と出力が増加する。
- ・この傾向は，船体の横方向からの風において特に顕著で，剥離域を回避するため，ある程度のハブ高さが必要である。
- ・北海航路におけるエネルギー収支計算の結果，船舶の進行方向への風の出現確率ならびに風速が高い場合，ならびに，航行速度が低い場合に，風車

によるエネルギー収支改善の効果が高いことを示した。

- ・特定の風向・風速で停止するセクターマネジメントを適切に適用することにより，経済性が更に改善する。

本研究によりエネルギー収支に対する効果が示されたが，実用化に向けて，以下のような課題がある。

- ・設置基数も含めた，風車諸元の最適化。
- ・暴風時等における安定性・強度，ならびに，耐久性の確保。
- ・製造，運転・保守，廃棄の全てを考慮したライフサイクルコストによる効果の評価。

参考文献

- Momoki, T., et al, A Study on Development a Next Generation Vessel, Feasibility Studies on Introduction of Photovoltaic Generators for a Vessel, Proc. JASNAOE, 8, 2009S-G3-4, pp.247-250, 2009.
- Asaji, K., et al, About Vertical Axis Wind Turbines for Ships, JAXA-SP-06-020, 2007.
- Wubbo, J., Ruiterkamp, R., Landsdorp, B., Ship Propulsion by Kites Combining Energy Production by Laddermill Principle and Direct Propulsion, Kite Sailing Symposium, 2006.
- Wind Power Onboard a Ferry, Energy Insight, Jun/24, 2011.
- 吉澤壮他，再生可能エネルギーを利用した次世代船舶の開発について，日本航空宇宙学会西部支部講演会，2012.
- Sebring Express, marinetraffic.com/fr/ais/details/ships/548817000, 2013.
- Nobue, Y. et al., Development of Wind Turbine System for Isolated Islands in Japan, World Wind Energy Conference, 2000.
- GL Garrad Hassan, Bladed for Windows, 4.2.0.83, 2012.
- Oregon State University, Climatology of Global Ocean Winds, 2013.