

風力補助推進システムに関する EEDI/EEXI の認証



**一般財団法人 日本海事協会
技術研究所**

GHG 削減と経済発展の両立の観点から、個船の**エネルギー効率（燃費）改善**に着目

設計上の燃費規制（スペック）

運航上の燃費規制（実燃費）

2013

- **EEDI（エネルギー効率設計指標）**
新たに建造される船舶が対象
⇒基準となる設計燃費を満足できない場合は
就航できない

- **SEEMP（船舶エネルギー効率管理計画）**
就航船の燃費を計測・改善する計画を立てる

2018

■ **2018年 GHG 排出削減戦略（今世紀中出来る限り早期に GHG ゼロ排出）**

2019

- **IMO-DCS（燃料消費量報告制度）**
就航船の燃料消費量を計測し、報告する

2023

- **EEXI（就航船の燃費性能指標）**
就航船を含む全ての船舶が対象
⇒基準となる設計燃費を満足できない場合は
主機出力の制限（EPL）等が必要

- **燃費実績の格付け制度（CII 格付け）**
実燃費を格付けし、低評価船は改善措置を図る

■ **2023年 GHG 排出削減戦略（遅くとも2050年頃までに GHG ネットゼロ排出）**

EEDI/EEXI : 新造時の船舶のスペックの1つで『効率のポテンシャル』を表す指標

計算式: EEDI/EEXI [g/ton · mile]=

$$\frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}) + \left\{ \left(\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)} \right) \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right\} - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w}$$

基本概念

$$EEDI/EEXI \text{ [g/ton · mile]} = \frac{\text{CO}_2 \text{換算係数 (C}_F\text{)} \times \text{燃料消費率 (SFC) [g/kW · h]} \times \text{機関出力 [kW]}{\text{積載能力 (Capacity}^*\text{) [ton]} \times \text{EEDI船速 (V}_{ref}\text{) [knots]}}$$

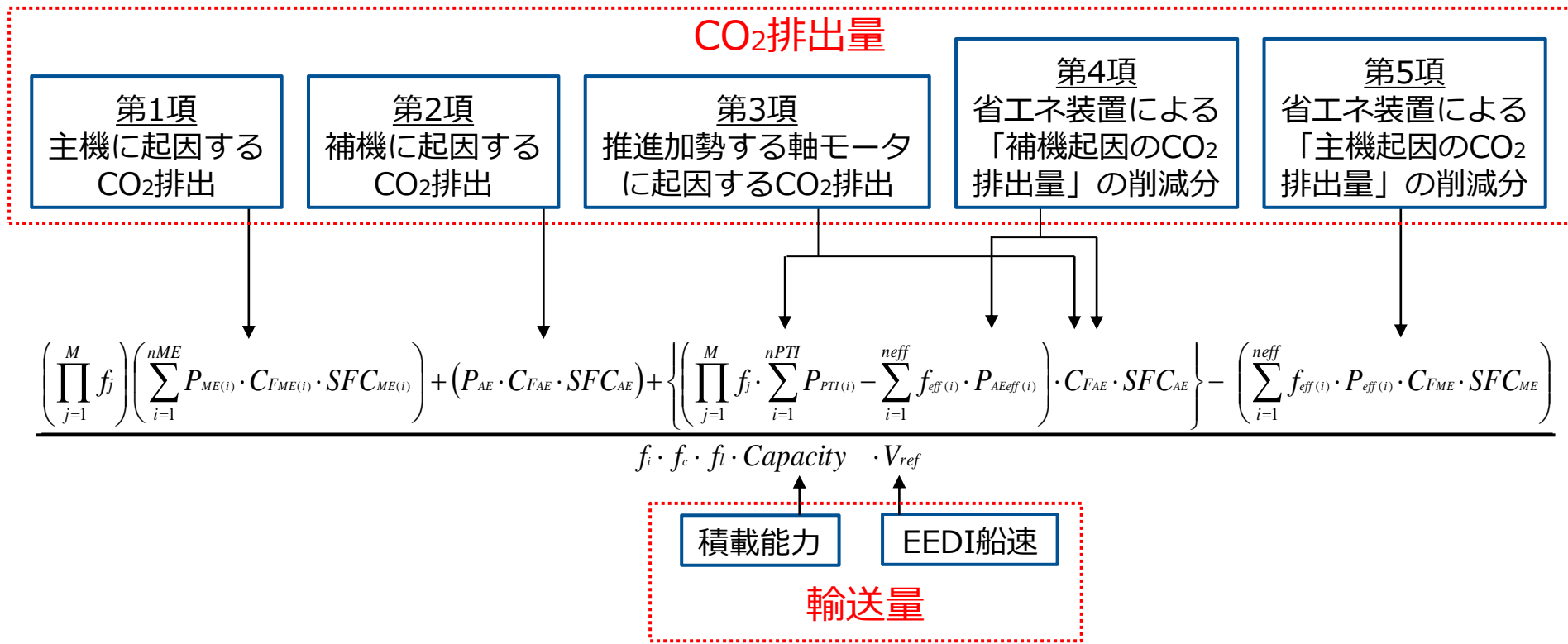
1tonの貨物を1mile輸送した際のCO₂排出量(g)

※ DWT (但し, コンテナ船は70%DWT, 客船はGT)

条約要件

- 指定された船種にのみ適用
- 船種ごとに定められたサイズ <
 - 以上の船舶 → 規制値への適合が要求
 - 未満の船舶 → 規制値の設定が無い

EEDI/EEXI 計算式



P _{ME} :	主機出力 0.75×(MCR _{ME} - P _{PTO}) [kW] (P _{PTO} は軸発出力であり、軸発搭載時は原則P _{AE} を上限に控除可能)
P _{AE} :	補機出力 0.025×MCR _{ME} +250 [kW] (ただし、MCR _{ME} < 10,000 kWの場合は0.05×MCR _{ME})
P _{PTI} :	軸モータによる出力消費の75% [kW]
SFC :	燃料消費率 [g/kWh]
C _F :	燃料油種類別によるCO ₂ 換算係数
Capacity :	DWT (但し、コンテナ船は70%DWT, 客船はGT)
V _{ref} :	平水中、最大夏期満載喫水 (コンテナ船は70%DWT時の喫水) における出力P _{ME} 時の船速 [knots]

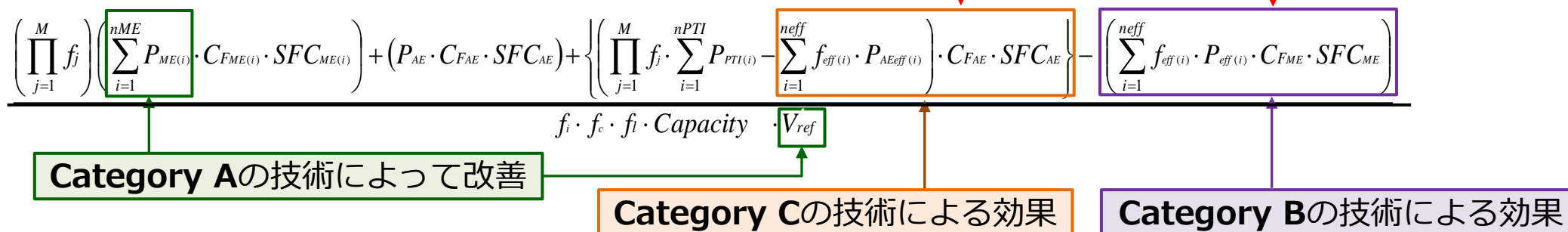
省エネ機器による控除

f_{eff} : 省エネ機器の稼働率
 P_{AEff} : 省エネ機器により控除される補機出力[kW] (P_{ME}時の値)
 P_{eff} : 省エネ機器により控除される主機出力の75% [kW]

省エネ装置によるCO₂排出削減量

第4項
 省エネ装置による「補機起因のCO₂排出量」の削減分

第5項
 省エネ装置による「主機起因のCO₂排出量」の削減分

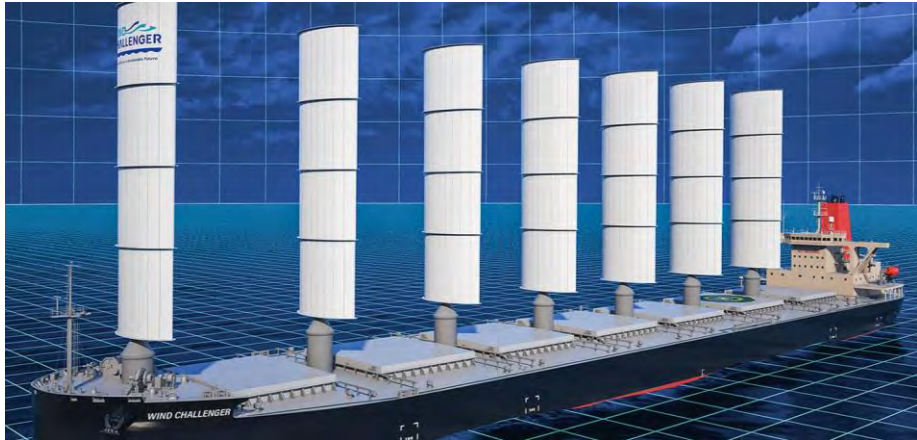


Category B 及び Category C の省エネ技術については「革新的省エネ技術ガイダンス」に従って数値化が可能

分類	内容			省エネ技術
Category A	推進効率・全抵抗に影響し、パワーカーブに反映されるもの			船尾付加物, 船型改良等
Category B	(B-1)	ON状態であれば常に、主機の出力を減少させるもの	$f_{eff} = 1.0$	空気潤滑システム
	(B-2)	周辺環境に依存し、主機の出力を減少させるもの	$f_{eff} < 1.0$	風力推進システム
Category C	(C-1)	ON状態であれば常に補機・モーターの出力を減少させるもの	$f_{eff} = 1.0$	廃熱回収システム
	(C-2)	周辺環境に依存し、補機・モーターの出力を減少させるもの	$f_{eff} < 1.0$	太陽光発電システム

1. MEPC 65（2013年）において、風力補助推進システム WAPS（Wind assisted propulsion systems）、空気潤滑システム、廃熱回収システム等の革新的省エネ技術による効果を EEDI の枠組みに組み込むために「2013年 EEDI 計算及び認証のための革新的省エネ技術の取扱いに関するガイダンス（革新的省エネ技術ガイダンス）（MEPC.1/Circ.815）」が承認された。
2. 風力補助推進システムについては、本ガイダンスに規定された Wind Force Matrix（風向・風速毎の風による推進力）の推定方法や検証方法をはじめ、Global Wind Probability Matrix（全世界航路における風の発現確率）が未完成だったため、その効果を EEDI に反映できなかった。
3. 一方、日本では風力補助推進システムの具体的な導入プロジェクトが複数存在しており、その燃費性能を公式に評価できる環境を早期に整備する必要があったことから（業界要望）、その効果を早急に EEDI に反映できるようにするために、MEPC 76（2021年3月）において、日本は中国やドイツと共に、風力補助推進システムに関する革新的省エネ技術ガイダンスの改正案を提出した。（NK は技術面で日本をサポート）
4. MEPC 76 には、フィンランド、フランス、Comoros、RINA から風力補助推進システムに関する提案文書が提出されたものの、審議時間の関係上、次回 MEPC 77 に先送りされた。
5. MEPC 77（2021年11月）において、MEPC 76の日本・中国・ドイツの改正案をベースに、フィンランド、フランス、Comoros、RINA の要素を反映した改正案が承認され、「2021年 EEDI 及び EEXI の計算及び認証のための革新的省エネ技術の取扱いに関するガイダンス（MEPC.1/Circ.896）」として発行され、ようやくその効果が EEDI/EEXI に反映できるようになった。

Hard sail



<https://www.mol.co.jp>

Soft sail



<https://www.neoline.eu>

Kite



<https://www.kline.co.jp>

Rotor sail



<https://www.norsepower.com>

Suction wing



<http://site.craintechologies.com>

Hull Form



<https://ladeas.no>

$$\frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}) + \left\{ \left(\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)} \right) \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right\} - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot V_{ref}}$$



© Shipping Zero Emission Project

$$(f_{eff} \cdot P_{eff}) = \left(\frac{1}{\sum_{k=1}^q W_k} \right) \cdot \left(\left(\frac{0.5144 \cdot V_{ref}}{\eta_D} \sum_{k=1}^q F(V_{ref})_k \cdot W_k \right) - \left(\sum_{k=1}^q P(V_{ref})_k \cdot W_k \right) \right)$$

with $F_1 - F_k \geq 0 \wedge F_{k-1} - F_k \geq 0$

(sorting all force matrix elements in descending order)

and $\sum_{k=1}^{q-1} W_k < \frac{1}{2} \wedge \sum_{k=1}^q W_k \geq \frac{1}{2}$

(defining q: the number of elements added in the formula)

$F(V_{ref})_k$: 風向・風速毎の風による推進力に関する行列 (Wind Force Matrix)

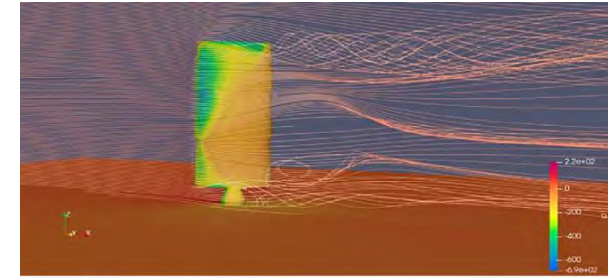
W_k : 世界の主要航路よる全世界航路における風向・風速毎の発現確率に関する行列 (Global Wind Probability Matrix)

$P(V_{ref})_k$: 風力補助推進システムの消費電力に関する行列

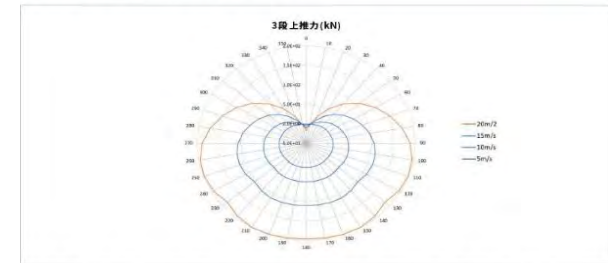
- Wind Force Matrix と Global Wind Probability Matrix を掛け合わせることで風力補助推進システムによる推進力を計算し、その推進力を船舶の推進効率で割ることによりプロペラ推進力の減少分を求め、この減少分とシステムの消費電力から主機関からの CO₂ 削減量を求める。

Wind Force Matrix

- 風洞試験、CFD 等の数値計算、実機による試験から風向・風速毎の風による推進力に関する行列 (Wind Force Matrix) を求める。

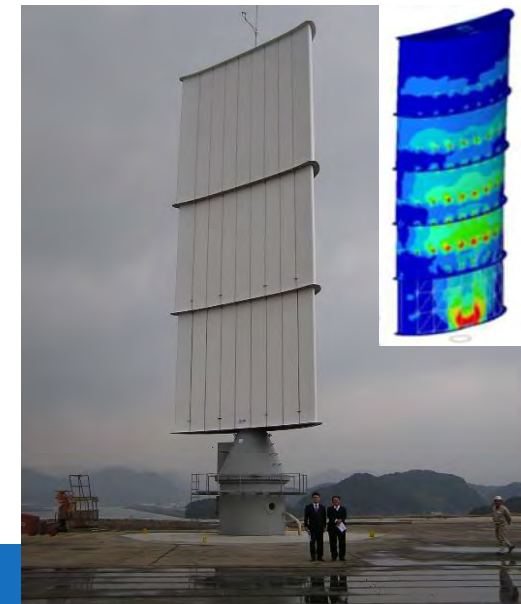


CFDによる帆の性能推定計算



硬翼帆のポーラーダイアグラム (風向と風速による推力チャート)

Wind Angle (°)	Wind speed (m/s)																							
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115
<1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	3.7	5.0	6.0	6.5	6.7	6.6	6.2
<4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	9.3	13.3	16.6	19.1	21.0	22.1	22.6	22.6	22.0	21.0	19.6
<5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.4	13.5	20.6	26.5	31.4	35.1	37.7	39.2	39.6	39.1	37.8	35.8	33.3	30.5
<6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3	19.9	30.1	38.8	45.9	51.4	55.1	57.2	57.7	56.8	54.8	51.8	48.1	43.9	39.4
<7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	22.2	36.5	48.9	59.2	67.2	72.9	76.3	77.4	76.6	74.1	70.3	65.6	60.2	54.5	48.6
<8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.6	37.9	55.1	69.8	81.6	90.3	95.9	98.5	98.5	96.1	92.0	86.6	80.4	73.6	66.5	59.2	
<9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.1	32.5	55.6	75.8	92.7	105.9	115.1	120.4	122.1	120.7	116.8	111.2	104.4	96.8	88.7	80.2	71.4	
<10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.1	48.1	75.1	98.5	117.6	132.0	141.6	146.4	147.0	144.3	139.1	132.1	124.0	115.1	105.6	95.5	85.3	
<11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.4	65.3	96.5	123.1	144.5	160.1	169.8	174.0	173.6	169.6	163.1	154.9	145.6	135.3	124.2	112.6	101.0	
<12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	44.0	84.1	119.7	149.7	173.4	190.0	199.8	203.3	201.9	196.8	189.2	179.8	169.2	157.4	144.7	131.6	119.2	
<13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.1	58.9	104.5	144.7	178.3	204.1	221.8	231.6	234.5	232.1	225.9	217.3	206.8	194.8	181.4	167.0	152.8	140.4
<14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.8	75.1	126.5	171.6	208.8	236.8	255.5	265.2	267.6	264.3	257.2	247.5	235.8	222.4	207.3	191.4	176.5	165.0
<15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.4	92.6	150.2	200.3	241.1	271.5	291.1	300.8	302.6	298.5	290.5	279.8	266.9	251.9	235.1	218.0	203.1	193.3
<16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.8	111.4	175.4	230.8	275.4	308.1	328.6	338.4	339.6	334.8	325.9	314.3	300.0	283.4	265.0	247.0	232.6	225.3
<17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	53.2	131.5	202.3	263.1	311.7	346.6	368.1	377.9	378.6	373.1	363.5	350.8	335.2	316.9	297.0	278.5	265.4	261.2
<18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	66.5	152.9	230.7	297.2	349.8	387.1	409.6	419.4	419.8	413.7	403.3	389.5	372.4	352.4	331.2	312.6	301.4	301.1
<19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	80.8	175.6	260.8	333.1	389.8	429.5	453.0	463.0	456.3	445.2	430.3	411.7	390.0	367.7	349.4	340.6	344.8	
<20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.9	199.6	292.4	370.8	431.8	473.9	498.5	508.6	508.3	501.1	489.3	473.2	453.0	429.6	406.5	389.1	383.3	392.5
<21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	111.9	224.8	325.7	410.4	475.6	520.3	546.0	556.3	555.7	548.1	535.5	518.2	496.4	471.4	447.6	431.5	429.5	444.1
<22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	128.9	251.4	360.5	451.7	521.4	568.7	595.5	606.0	605.3	597.3	583.9	565.4	541.8	515.4	491.2	476.9	479.0	499.6
<23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	146.8	279.3	396.9	494.7	569.1	619.0	647.0	657.8	657.0	648.6	634.4	614.6	589.4	561.5	537.3	525.2	532.0	558.8
<24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	165.6	308.4	434.9	539.6	618.7	671.3	700.6	711.8	710.8	702.0	687.1	665.9	639.0	609.9	585.9	576.4	588.4	621.9
<25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.4	185.3	338.8	474.5	586.3	670.2	725.7	756.2	767.8	766.8	757.7	741.9	719.3	690.7	660.4	630.5	648.3	688.8
≥25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.5	195.5	354.6	494.9	610.3	696.7	753.6	784.7	796.6	795.6	786.3	770.1	746.8	717.4	686.6	663.4	658.7	679.5	723.6



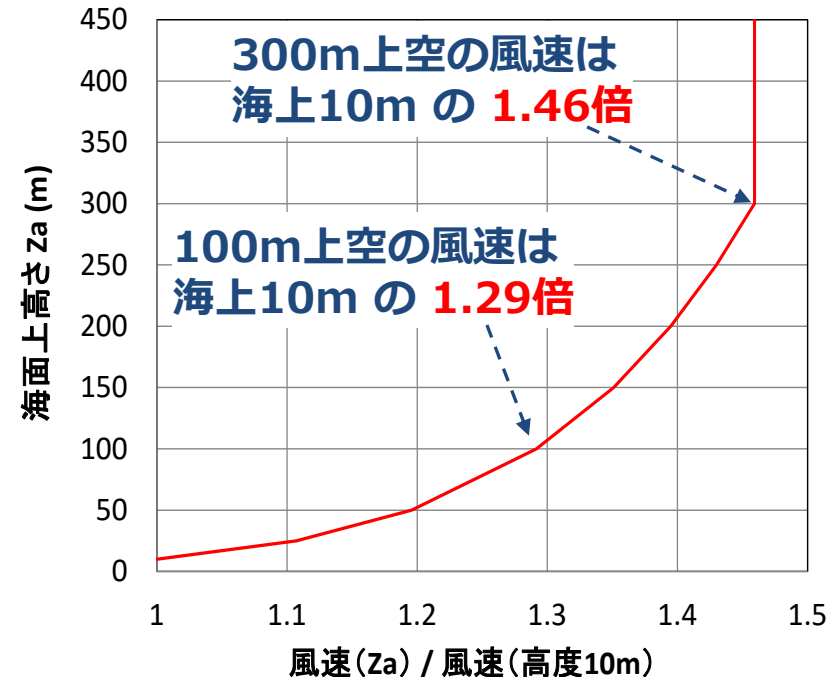
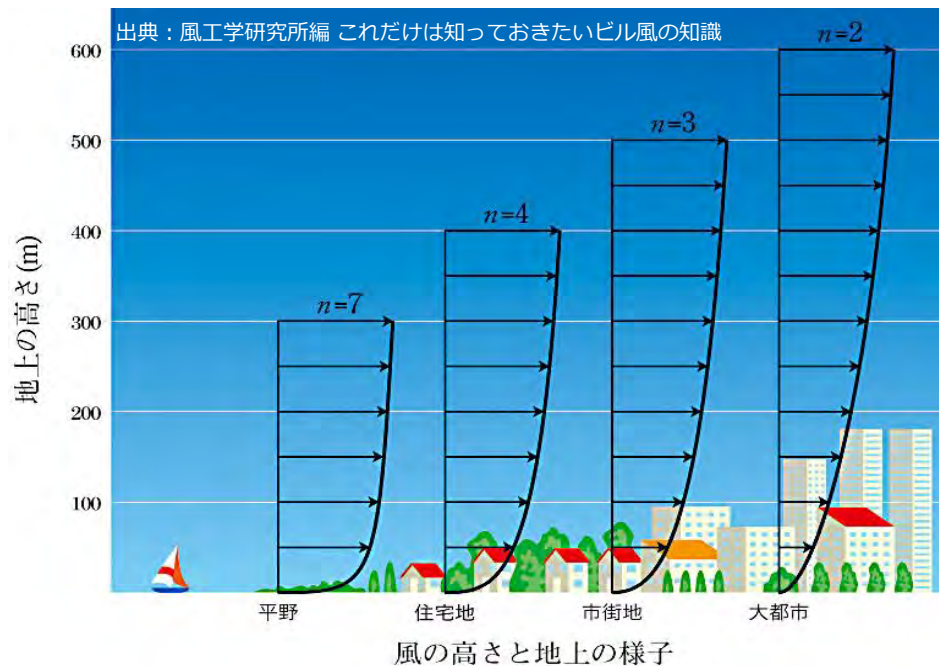
風速の高度影響の考慮

- 地表や海面付近の風は摩擦の影響により風速が上空よりも減少。
- 地上や海上からの高さによる風速の変化（風速の鉛直分布）を表す式として「べき法則」があり、革新的省エネ技術ガイダンスでは、風速の高度影響を考慮できるように、ITTC の推奨手法に従い、海上 10m の風速を基準とする 1/9 乗則を採用。
- カイトは上空を飛行するため、飛行高度における風速を用いて推進力を求め、帆も同様に風速の鉛直分布を考慮して推進力を求める。

$$v_{Z_{ref}} = v_{10m} \left(\frac{Z_{ref}}{10} \right)^\alpha \text{ for } z_{ref} < 300m$$

$$v_{Z_{ref}} = v_{10m} \left(\frac{300}{10} \right)^\alpha \text{ for } z_{ref} \geq 300m$$

Z_{ref} is the reference height above the water line, to be equal to the point of mid-height of each sail, Flettner, etc. in wind assisted propulsion system;
 V_{10m} is the wind velocity at 10 m above sea level;
 $V_{Z_{ref}}$ is the resulting wind velocity at the reference height; and
 α is taken as 1/9 conforming to ITTC recommendations.



Findings on the EEDI assessment framework for wind propulsion systems by China, MEPC 74/INF.39



A VLCC with a pair of “hard airfoil sails” developed by Dalian Shipbuilding Industry of CSIC with New Vitality (2018)

- 全世界航路の場合

$$21.1 - 19.5 = 1.6\% \text{ EEDI 改善}$$

- 中東 - 極東航路の場合

$$35.5 - 19.5 = 16\% \text{ EEDI 改善}$$



Figure 2: Global shipping routes network

7 The EEDI of New Vitality is calculated according to the wind probability matrix in document MEPC 62/INF.34. The percentage of EEDI below baseline increases from 19.5% to 21.1%. As shown in table 1 below, the contribution of the wind propulsion system to the percentage of EEDI below baseline is **only 1.6%**.

Table 1: EEDI evaluation of global routes for Hard Airfoil Sailing Project

	EEDI (Probability Matrix from document MEPC 62/INF.34)	Below the baseline value
No sails	2.061	19.5%
With sails	2.027	21.1%

8 When China tries deriving the wind probability matrix just from a particular route, such as the Middle East to the Far East route which VLCCs often operate in, the percentage of EEDI below baseline increases dramatically to 35.5% on account of the energy saving contribution of sails, as shown in table 2 below.

Table 2: EEDI evaluation of Middle East-Far East route for Hard Airfoil Sailing Project

	EEDI (Wind Probability Matrix ¹ from Middle East-Far East route)	Below the baseline value
With sails	1.888	35.5%

- 風力補助推進システムにインセンティブを与えるために、Global Wind Probability Matrix のうち、風力が大きい上位半分の成分を残し、残り半分の成分を切り捨てる方法を採用（ドイツ・フィンランド提案）。1/3有義波高の考え方を応用したものであり、明確な物理的根拠はない。

□ MEPC 76/6/6 (Finland and Germany)

12 Recently, two Flettner rotors with a height of 35 m and a diameter of 5 m were installed on the 8,660 DWT ro-ro cargo ship MV. SC CONNECTOR. With an installed main diesel engine power of 5,600 kW and the total auxiliary power covered by the shaft generator, the calculated available effective power delivered by the wind propulsion system is 505 kW according to the calculation methodology as given in document MEPC 76/6/2, but [1423 kW] [1008 kW] when the [one-third] [one half] highest values are considered as proposed in this document.

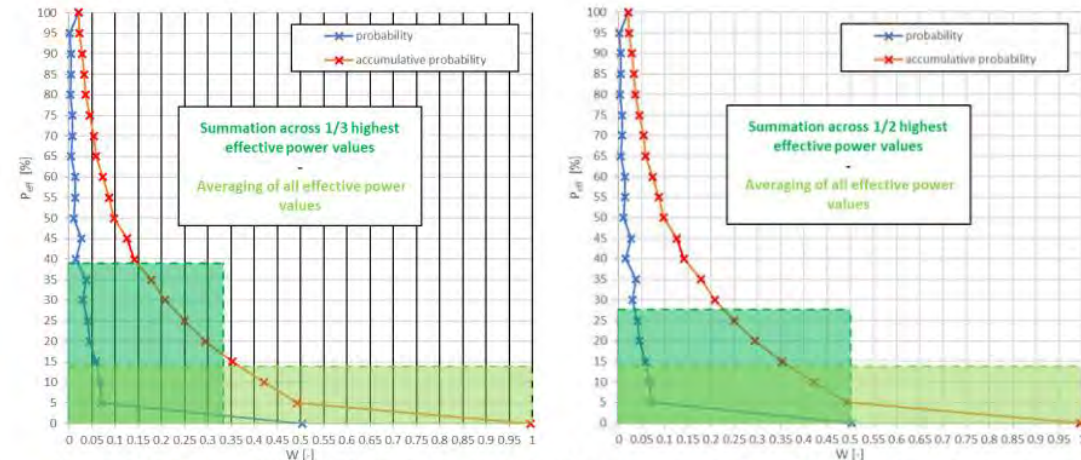


Figure 1: Probability distribution of effective power and available effective power of [one-third] [one half] highest values and of all values.

13 With the installation of the Flettner rotors the attained EEXI value of the ship is improved by 15% according to document MEPC 76/6/2, and by [42%] [30%] when the available effective power is calculated from the [one-third] [one half] highest power values only.

$$(f_{\text{eff}} \cdot P_{\text{eff}}) = \left(\frac{1}{\sum_{k=1}^q W_k} \right) \cdot \left(\left(\frac{0.5144 \cdot V_{\text{ref}}}{\eta_D} \sum_{k=1}^q F(V_{\text{ref}})_k \cdot W_k \right) - \left(\sum_{k=1}^q P(V_{\text{ref}})_k \cdot W_k \right) \right)$$

with $F_1 - F_k \geq 0 \wedge F_{k-1} - F_k \geq 0$

(sorting all force matrix elements in descending order)

and $\sum_{k=1}^{q-1} W_k < \frac{1}{2} \wedge \sum_{k=1}^q W_k \geq \frac{1}{2}$

(defining q: the number of elements added in the formula)

- Flettner rotor 搭載 8,660DWT RO-RO貨物船の場合
EEDI/EEXI 15%改善 (インセンティブ無)
EEDI/EEXI 30%改善 (インセンティブ有)



- 革新的省エネ技術ガイダンスに従い、Wind Force Matrix の設定根拠を含む各種資料（風洞試験結果、CFD等の数値計算結果、実機による試験結果等）の確認をはじめ、装置の構成や搭載の確認を行い、EEDI/EEXI 値を認証する。
- 本ガイダンスには、下記の通り、海上試運転で装置の効果を確認することが規定されているが、風力補助推進システムの場合、実測された風向・風速下での効果を予備認証時の推定値と比較する程度であり、装置によっては推定値と比較することができないため、「Total net power」を海上試運転で確認するのは困難。
 - ✓ 革新的省エネ技術ガイダンス (MEPC.1/Circ.896)
 - 2.7.3 Final verification of the attained EEDI
 - 2.7.3.1 The total net power generated by wind assisted propulsion systems should be confirmed based on the documentation in the EEDI Technical File. For final verification, EEDI verifier should check that the configuration of the installed wind assisted propulsion system agrees with the system as described in the EEDI Technical File.

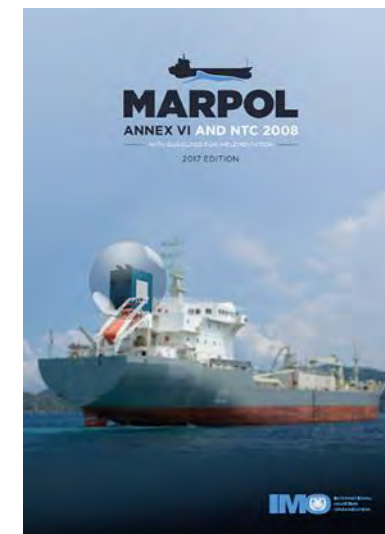
革新的省エネ技術ガイダンスの改正にあたり、風力補助推進システムの効果を早急に EEDI/EEXI に反映できるようにすることが優先されたため、インセンティブの妥当性など、改善の余地が残されていることから、今後、その効果をより適切に評価できるガイダンスの改正（改善）が望まれている。改善が望まれる事項は以下が考えられる。

1. EEDI/EEXI は 75%MCR 時の船速（タンカーやバルカーでは 14 から 15knot）で評価するが、現在、減速運航が常態化（約 12knot）しているため、最早、評価船速が実態と乖離している。風力補助推進システムでは船速が遅いほどその効果の割合が高く、EEDI/EEXI は実際の効果を過小評価しているため、今後、船速の補正式等を開発し、導入すること。
2. 船舶はあらゆる航路に投入される可能性があるため、改正ガイダンスでは、特定の航路ではなく、世界の主要航路による全世界航路で評価している。このため、EEDI/EEXI 上の効果と実際の効果は乖離してしまうが、設計指標によるコンセプトの限界であり、運航指標の CII には実際の効果が反映される。しかしながら、世界の主要航路においても、風速・風向が最適な航路が存在するため、今後、その最適航路に基づく Wind Probability Matrix を開発し、導入すること。

次頁へ続く

3. 特定航路における風力補助推進システムの効果を適切に予測（評価）することは、商談上、メーカーや船主等の関係者にとって重要なため、IMO とは関係ないが、IMO ガイダンスに、参考情報として、特定航路の Wind Probability Matrix が記載されると、関係者にとって大変有益であり、第三者による性能鑑定にも有効活用できる。
4. 改正ガイダンスでは、風力補助推進システムにより生じる斜航や当舵の影響が考慮されていないため、今後、その影響について調査し、要すれば、影響の補正式等を開発し、導入すること。
5. 風力補助推進システムにインセンティブを与えるために、Global Wind Probability Matrix のうち、風力が大きい上位半分の成分を残し、残り半分の成分を切り捨てる方法を採用したが、1/3有義波高の考え方を応用したものであり、明確な物理的根拠はないことから、今後、その妥当性を検証し、要すれば改善すること。
6. 風洞試験、CFD 等の数値計算、実機による試験、海上試運転での試験方法等に関する実施方法や検証方法についても、今後、その詳細を規定すること。

- 風力補助推進システムの効果をより適切に評価できる IMO ガイドランスの改正（改善）にあたり、引き続き、NK は技術面で積極的にサポートすることで貢献させていただきます。
- 風力補助推進システムに関する EEDI/EEXI 認証をはじめ、特定航路における性能鑑定や実際の GHG 削減量に関する認証など、様々な GHG に関する第三者認証において、今後とも、皆様のお役に立てれば幸甚です。



THANK YOU

for your kind attention

