

第86回実海域推進性能研究会  
令和6年2月19日

# 風力推進船のウェザールーティング

粉原直人

海上技術安全研究所 流体設計系



## 発表内容

- 研究背景
- ローター船の風圧力特性の推定
- ローター船の実海域性能評価
- ウェザールーティングによる省エネ効果の評価
- まとめ



# 発表内容

- 研究背景
- ローター船の風圧力特性の推定
- ローター船の実海域性能評価
- ウェザールーティングによる省エネ効果の評価
- まとめ



2018年 国際海事機関（IMO）にて GHG削減初期戦略 を採択

- 国際海運からのGHG排出量を今世紀中の早い段階でゼロにすることを求めるもの
- 実運航からのCO2排出量を削減するための革新的省エネ技術の開発が必要



革新的省エネ技術

Reduction of Main Engine Power			Reduction of Auxiliary Power	
Category A	Category B-1	Category B-2	Category C-1	Category C-2
Cannot be separated from overall performance of the vessel	Can be treated separately from the overall performance of the vessel		Effective at all time	Depending on ambient environment
	$f_{eff} = 1$	$f_{eff} < 1$	$f_{eff} = 1$	$f_{eff} < 1$
- low friction coating - bare optimization - rudder resistance - propeller design	- hull air lubrication system (air cavity via air injection to reduce ship resistance) (can be switched off)	- wind assistance (sails, Flettner-Rotors, kites)	- waste heat recovery system (exhaust gas heat recovery and conversion to electric power)	- photovoltaic cells

MEPC.1/Circ.896より

$f_{eff}$ : availability factor



## 風力アシスト：凧、帆、ローターなど



cargo-partner社HPより



商船三井HPより



Anemoi社HPより

- 風力を推進力の一部として利用することで、燃料消費量を削減し省エネルギーを実現する。
- 初期投資増加分を実運航で回収するためには調達段階で省エネ効果を予測する必要がある。

ウェザールーティングにより、ローター船の省エネ効果を評価する。

## 発表内容

- 研究背景
- **ローター船の風圧力特性の推定**
- ローター船の実海域性能評価
- ウェザールーティングによる省エネ効果の評価
- まとめ



## 対象船：パナマックス型撒積船

Item	Value	Unit
Length overall ( $L_{OA}$ )	227.63	m
Length between perpendiculars ( $L_{PP}$ )	217.00	m
Breadth ( $B$ )	32.26	m
Draft at summer draft ( $d$ )	14.00	m
Projected transverse area ( $A_T$ )	385.50	m <sup>2</sup>
Projected transverse area ( $A_L$ )	1854.50	m <sup>2</sup>
Propeller diameter ( $D_p$ )	7.10	m
Maximum continuous rate (MCR)	9070	kW
Engine revolution at MCR	87.7	rpm
Design speed ( $V_{des}$ )	14.5	knot

## ローター要目

Item	Value	Unit
Height ( $H_{rot}$ )	24.0	m
Diameter ( $D_{rot}$ )	4.0	m
End plate diameter ( $D_E$ )	6.4	m



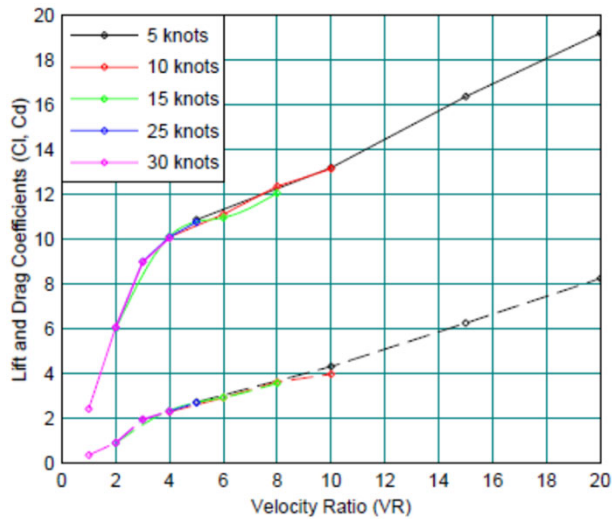
ローター設置位置：ミッドシップより45% $L_{PP}$ 前方  
センターライン上

## ローター単独の流体力

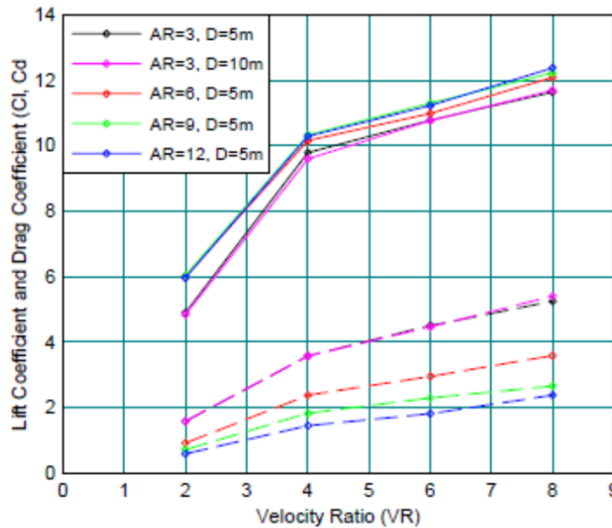
回転円柱周りの流場を数値計算により解析した、Jones et al.の研究\*に基づき推定

実線：揚力係数、破線：抗力係数

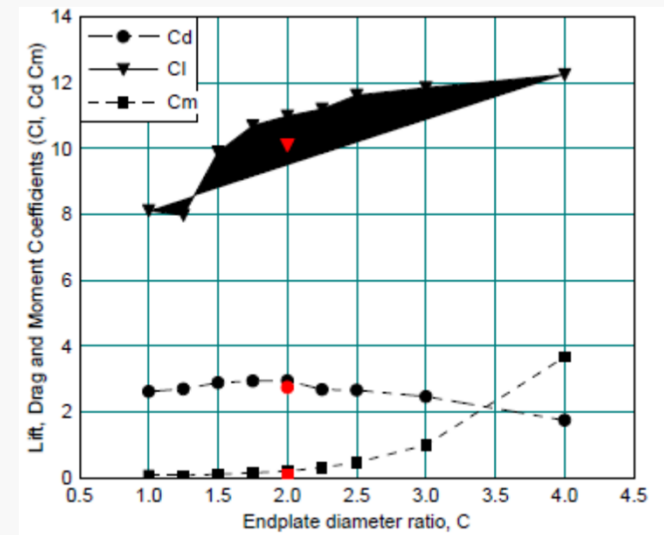
実線：揚力係数、破線：抗力係数



VRと揚力、抗力係数の関係  
(船速影響)



VRと揚力、抗力係数の関係  
(アスペクト比、直径影響)



ローター端板直径と  
揚力、抗力係数の関係

$$VR = \frac{\omega R}{U}$$

$\omega$  : ローター角速度  
 $R$  : ローター半径  
 $U$  : 相対風速

$$AR = \frac{H}{D}$$

$H$  : ローター高さ  
 $D$  : ローター直径

$$C = \frac{D_E}{D}$$

$D_E$  : ローター端板直径  
 $D$  : ローター直径

\*PREDICTED FUEL-SAVINGS FOR A FLETTNER ROTOR ASSISTED TANKER USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS, Wind Propulsion, RINA, 2019





## ローター単独の流体力

揚力係数  $C_L = \frac{F_L}{0.5\rho_A U_A^2 A_{rot}}$

抗力係数  $C_D = \frac{F_D}{0.5\rho_A U_A^2 A_{rot}}$

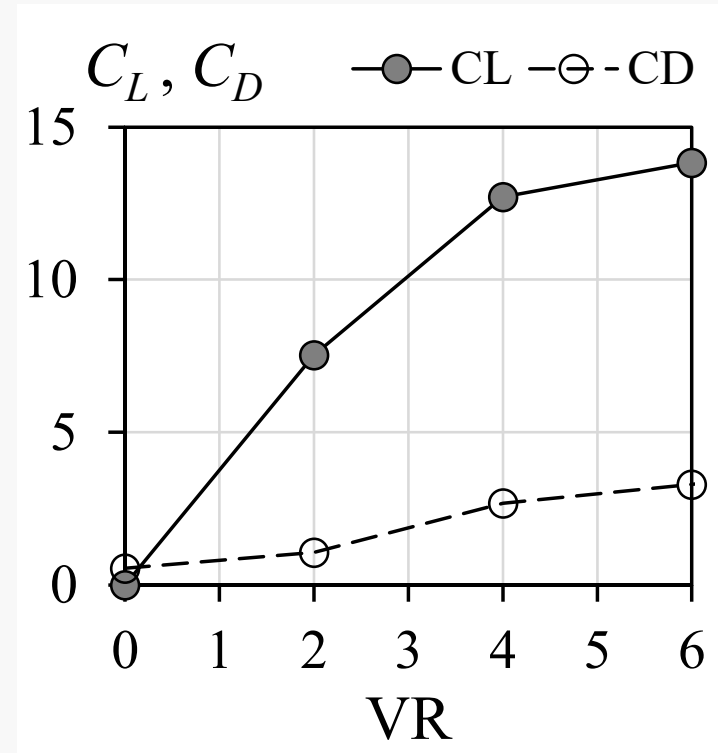
$F_L$  : 揚力

$F_D$  : 抗力

$\rho_A$  : 空気密度

$U_A$  : 相対風速

$A_{rot}$  : ローター投影面積 ( $H \times D$ )



## ローター船の風圧力特性の推定

- ローター単独の流体力を船長方向、幅方向に分解し、船体投影面積による無次元値に換算
- 船単独での風圧力に加えることで、ローター船の風圧力特性を算定  
(船-ローター間の干渉を考慮しない)

$$C_{Xrot} = (C_L \sin \Psi - C_D \cos \Psi) \cdot \frac{A_{rot}}{A_T} \quad A_T : \text{正面投影面積}$$

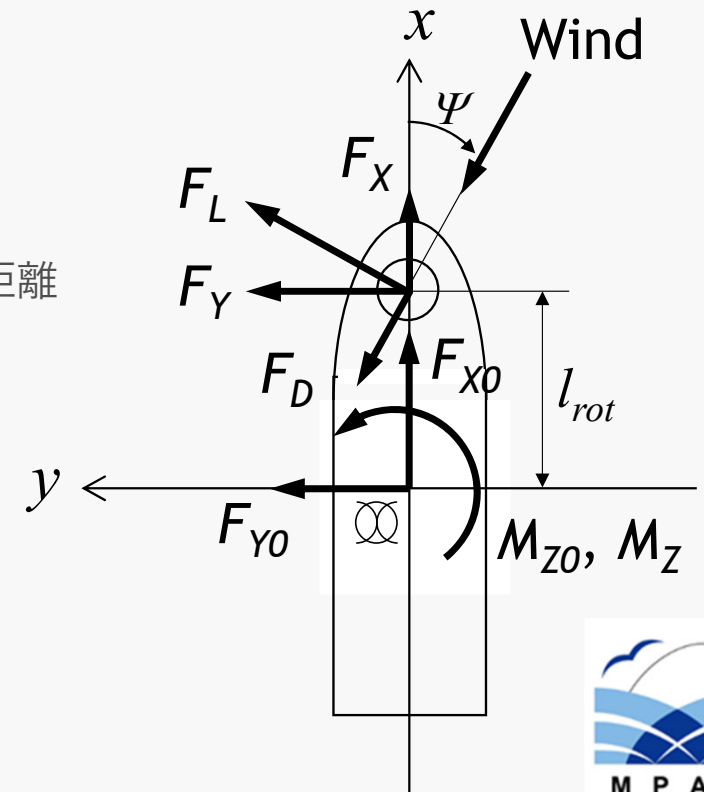
$$C_{Yrot} = (C_L \cos \Psi + C_D \sin \Psi) \cdot \frac{A_{rot}}{A_L} \quad A_L : \text{側面投影面積}$$

$$C_{Nrot} = C_{Yrot} \cdot \frac{l_{rot}}{L_{OA}} \quad L_{OA} : \text{全長}$$

$$C_{Nrot} = C_{Yrot} \cdot \frac{l_{rot}}{L_{OA}} \quad l_{rot} : \text{midshipからローターまでの距離}$$

船単独での風圧力 (藤原法 (2005) により算定)

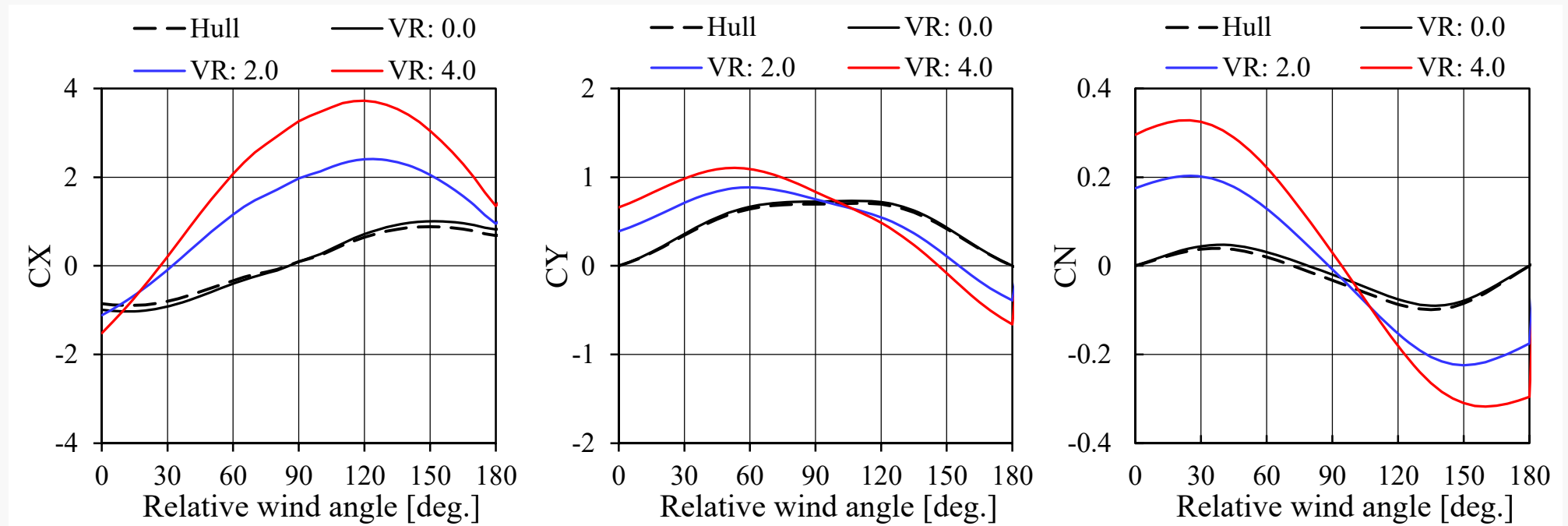
$$C_{X0} = \frac{F_X}{0.5 \rho_A U_A^2 A_T} \quad C_{Y0} = \frac{F_Y}{0.5 \rho_A U_A^2 A_L} \quad C_{N0} = \frac{M_Z}{0.5 \rho_A U_A^2 A_L L_{OA}}$$



### ローター船の風圧力特性

$$C_X = C_{X0} + C_{Xrot} \quad C_Y = C_{Y0} + C_{Yrot} \quad C_N = C_{N0} + C_{Nrot}$$

## ローター船の風圧力特性の算定結果



## 発表内容

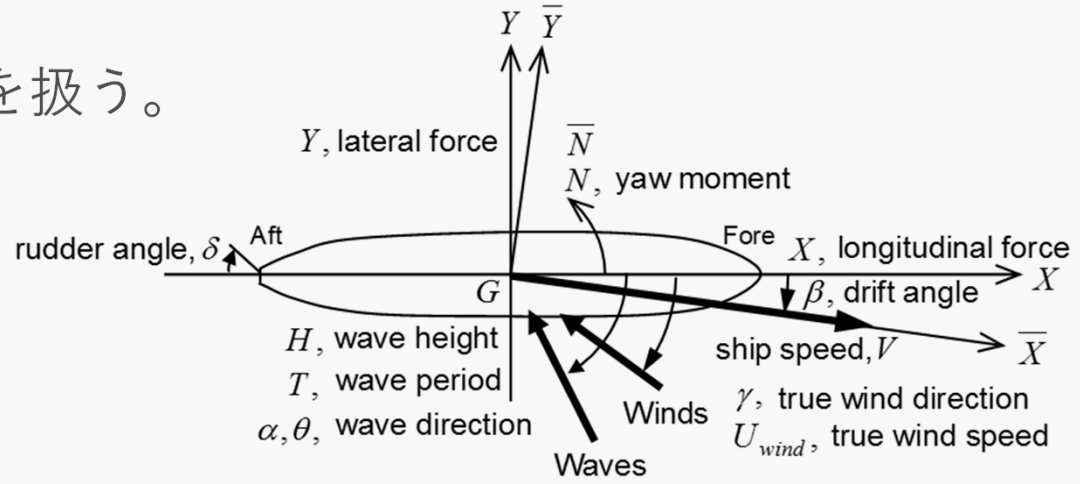
- 研究背景
- ローター船の風圧力特性の推定
- **ローター船の実海域性能評価**
- ウェザールーティングによる省エネ効果の評価
- まとめ

実海域性能評価（短期予測）

船首方位一定、定常速度で航行する状態を扱う。

外力の平衡方程式：

$$\begin{cases} \bar{X} = X \cos \beta + Y \sin \beta = 0 \\ \bar{Y} = X \sin \beta - Y \cos \beta = 0 \\ \bar{N} = N = 0 \end{cases}$$



右辺のX, Y, Zは以下の通り。

$$\begin{cases} X = X_D(\beta) + X_R(\beta, \delta) + X_A(V; U, \gamma) - X_{AW}(V, \beta; H, T, \theta) - \underbrace{X_0(V)}_{\text{平水中抵抗}} + \underbrace{(1-t)X_P(n_p, V)}_{\text{プロペラ推力}} \\ Y = Y_D(\beta) + Y_R(\beta, \delta) + Y_A(V; U, \gamma) + Y_{AW}(V, \beta; H, T, \theta) \\ N = N_D(\beta) + N_R(\beta, \delta) + N_A(V; U, \gamma) + N_{AW}(V, \beta; H, T, \theta) \end{cases}$$

斜航
当舵
風
波

未知数：プロペラ回転数 $n_p$ 、斜航角 $\beta$ 、舵角 $\delta$

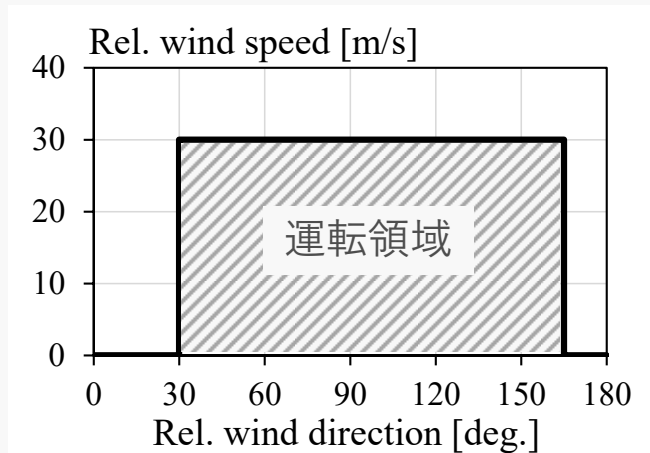


実海域性能評価（短期予測）

計算条件：船速一定（11.6knot）

ロータ一稼働条件：

- ✓ VRが一定となる様、ロータ一回転数を調整（VR=4.0一定）
- ✓ 相対風速30m/s以下、相対風向30~165度の両方を満足する場合、稼働する。
- ✓ 稼働動力については考慮しない。



設定海象

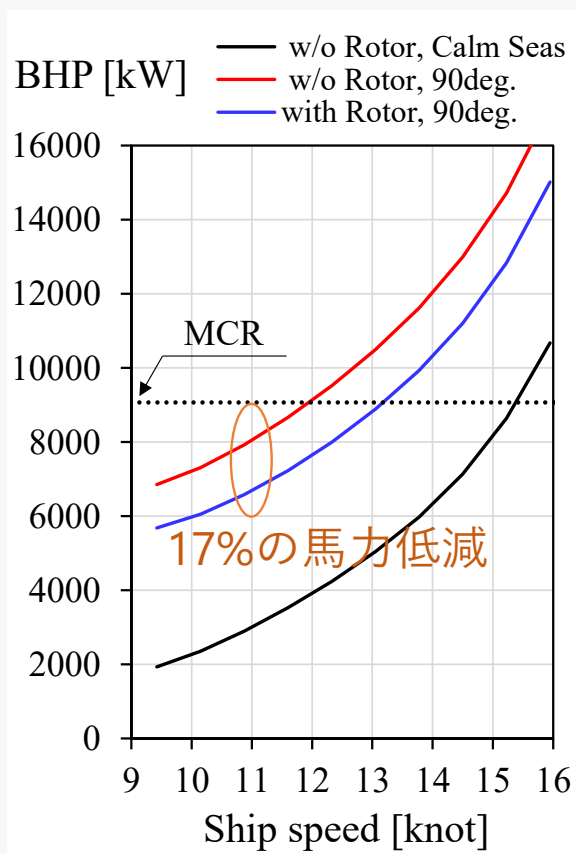
EC	絶対風速 [m/s]	有義波高 [m]	平均波周期 [s]
1	4.4	1.25	4.3
2	6.9	2	5.5
3	9.8	3	6.7
4	12.6	4	7.7
5	15.7	5.5	9.1
6	19.0	7	10.2

- ✓ 主波向、絶対風向は同一
- ✓ 0~180度まで30度刻み（0:向、180:追）

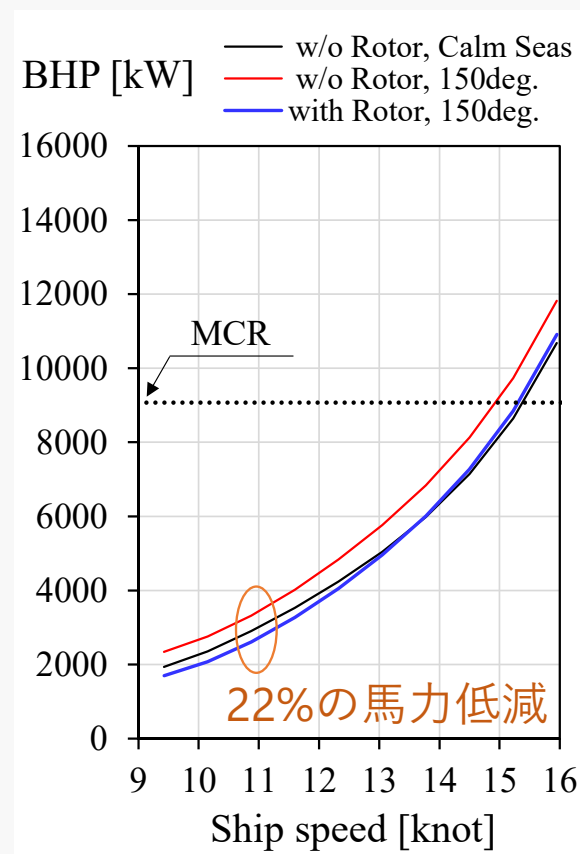


実海域性能評価 (短期予測)

EC5 (絶対風速15.7m/s, 有義波高5.5m, 平均波周期9.1s) でのパワーカーブ



主波向、絶対風向：90度



主波向、絶対風向：150度



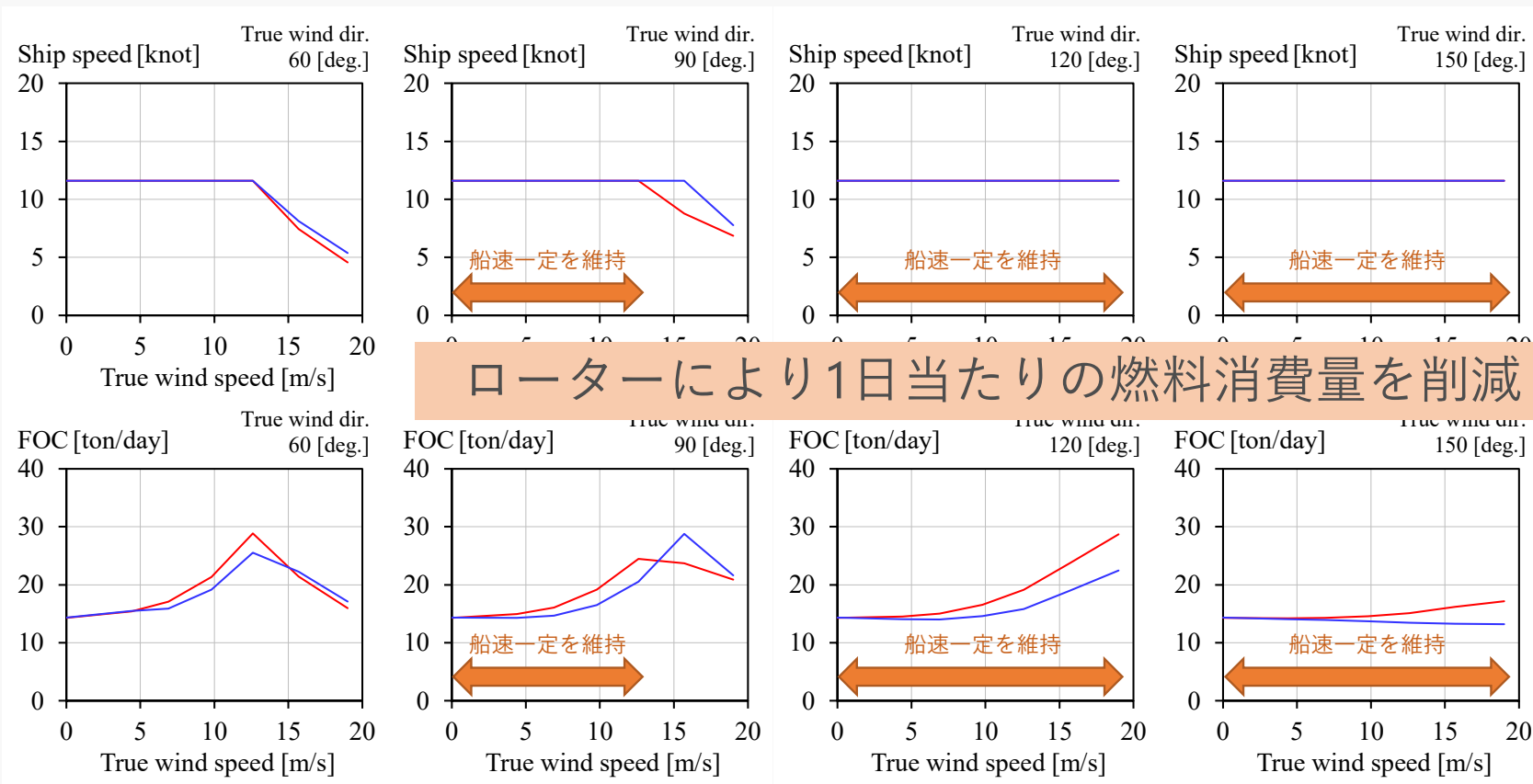
## 実海域性能評価（短期予測）

船速、1日当たりの燃料消費量の応答

（ローターが稼働する範囲のみ抜粋）

【船速一定制御（**11.6knot**）】

赤線：ローター無し 青線：ローター有り





## 発表内容

- 研究背景
- ローター船の風圧力特性の推定
- ローター船の実海域性能評価
- ウェザールーティングによる省エネ効果の評価
- まとめ

風力アシスト船でのウェザールーティング

省エネ効果を効果的に得るためには、ウェザールーティングが有効

過去の研究事例

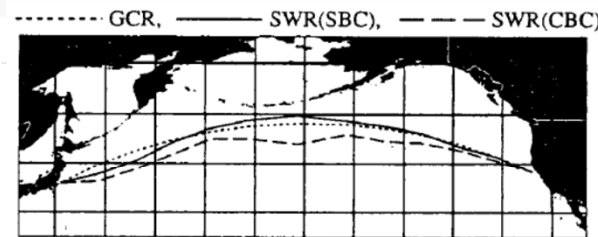
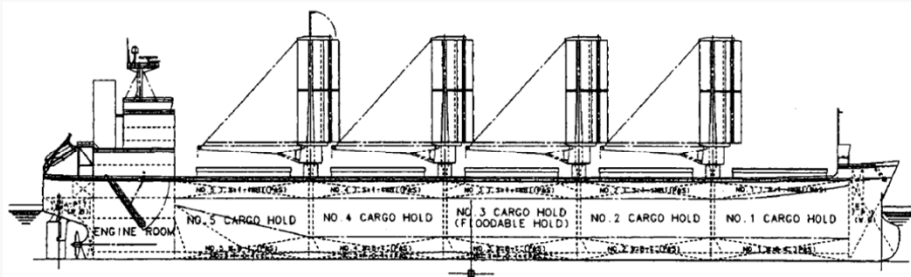


Fig. 14 Selected route; east bound in spring.

Table 10 Reduction of CO<sub>2</sub> emission.

Item	Reduction rate
high-lift hybrid sail	$1 - \frac{S_s}{C_s} = 11.7\%$
sail assisted weather routing system	$1 - \frac{C_s}{C_0} = 6.5\%$ (‡)
high-lift hybrid sail & sail assisted weather routing system	$1 - \frac{S_s}{C_0} = 17.4\%$ (‡)

‡: necessary to evaluate the difference of the passage time otherwise.

次世代帆走船でのウェザールーティング\*

ローター船にウェザールーティング (WAN) を適用し、省エネ効果を評価する。

\*辻本勝, 上野道雄, 藤田裕, 廣岡秀昭: 次世代型帆走船用ウェザールーティングシステムの開発とその評価, 関西造船協会論文集, 第242号, pp. 25-36, 2004.



## WAN (Weather Adaptive Navigation)

- 気象海象の予報データに基づき、燃料消費量の最小化を目的とした航路最適化を行う。
- 航海時間を制約条件に組み込むことで、定時性を考慮できる。
- 上下加速度や海水打ち込み等の耐航性能を制約条件として組み込むことにより安全性も考慮できる。
- 設計変数：船位※及び各船位での船速（主機回転数）  
※東西航路の場合、初期航路（大圏航路など）を経度方向に分割したときの緯度が設計変数となる。南北航路の場合は緯度を分割し、経度を設計変数とする。
- 海流データも利用可能
- 最適化システム：ASNOP（非線形計画法による最適化）



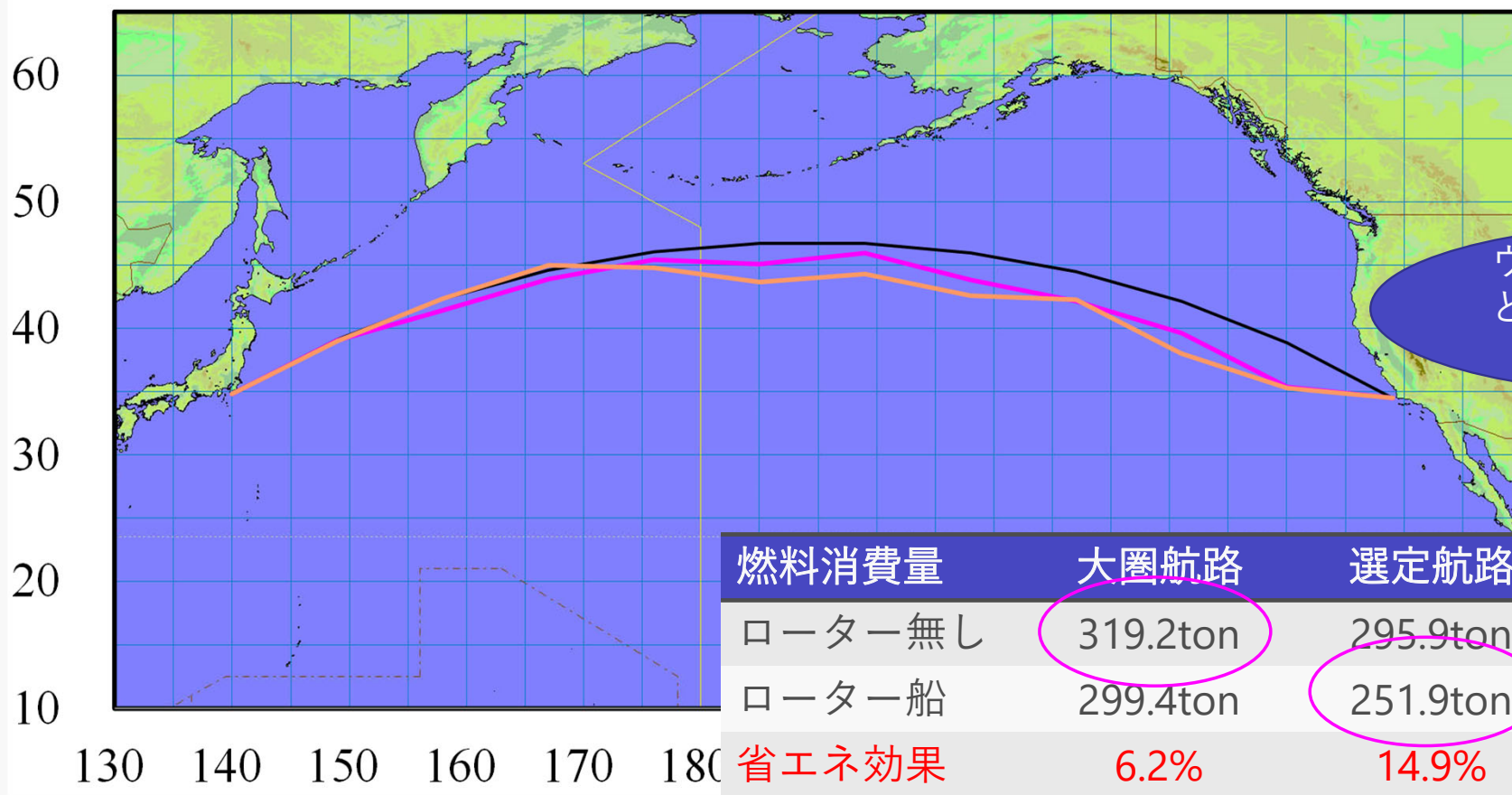
## WAN (Weather Adaptive Navigation)

- 対象船：パナマックス型撒積船
- 北太平洋航路の春季、東京～サンフランシスコ間の航海を対象
- 出航時刻：2019年3月1日12時、東航で実施
- 大圏航路長4650NM、設定船速10.8knotに設定（航海時間431時間）
- 大圏航路、選定航路のそれぞれで省エネ効果进行评估



ウェザールーティング結果 (選定航路と省エネ効果)

—GCR    — WAN (w/o Rotor)    — WAN (with Rotor)

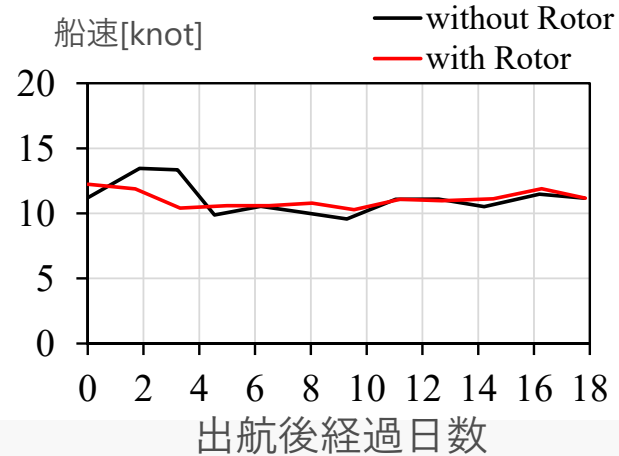
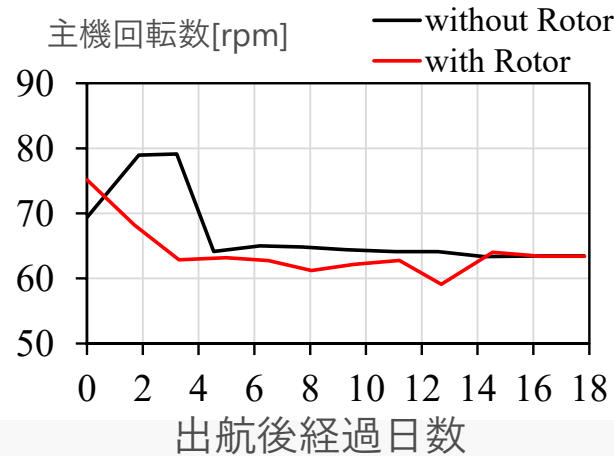
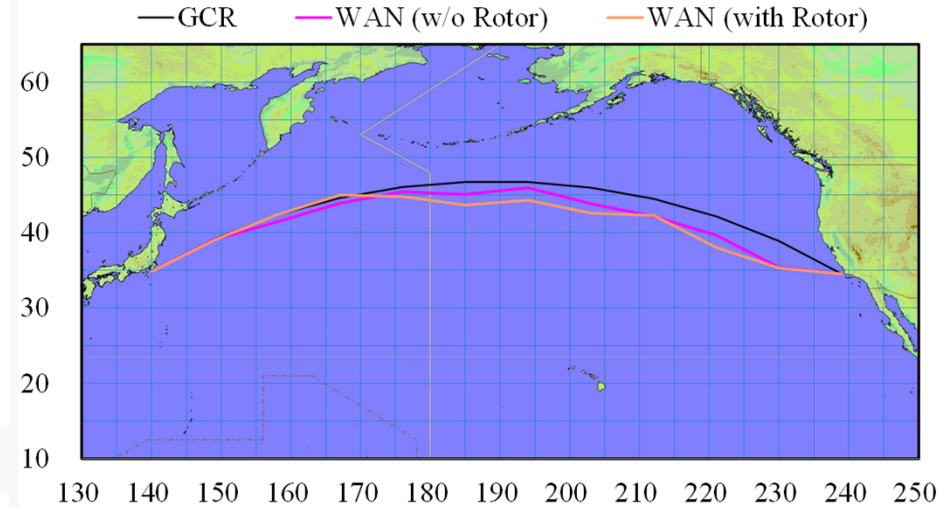
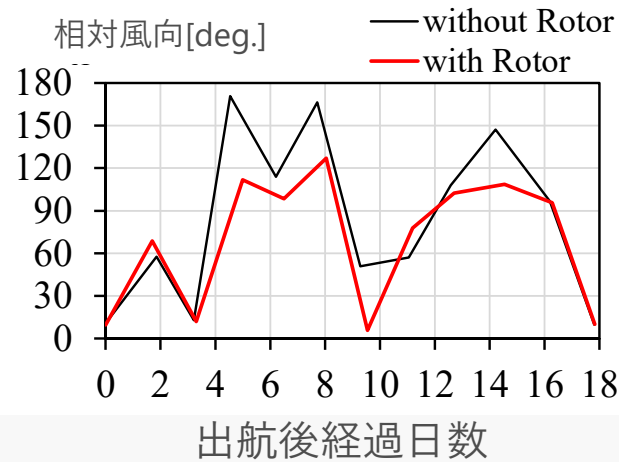
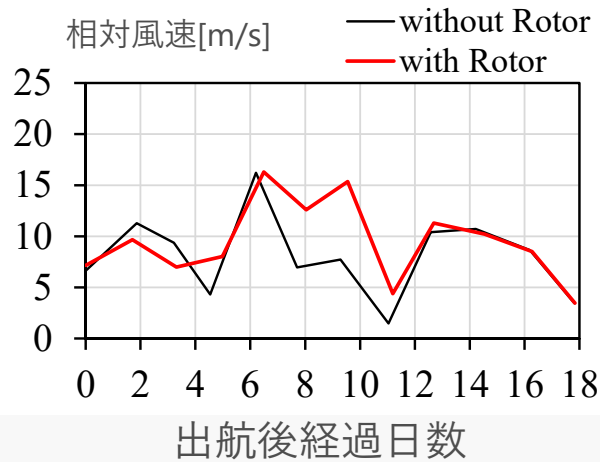


ウェザールーティングと組み合わせることで省エネ効果が向上

省エネ効果  
21.1%



## ウェザールーティング結果 (遭遇した風・主機回転数・船速)



東経170度以東では、ローター船はローターが無い場合より南側を航行  
 →ローター船にとって有意な風況に遭遇し、風力を有効利用



## 発表内容

- 研究背景
- ローター船の風圧力特性の推定
- ローター船の実海域性能評価
- ウェザールーティングによる省エネ効果の評価
- まとめ



- 風力アシスト船の一つであるローター船について、パナマックス型撒積船を対象に、実海域性能の短期予測及びウェザールーティングを実施し、省エネ効果を評価した。
- 北太平洋航路（春季、東航）においてウェザールーティングを実施し、今回の場合、大圏航路、選定航路上でそれぞれローター船の省エネ効果がそれぞれ **6.2%**、**14.9%**となることを示した。
- ローター船の選定航路での燃料消費量は、ローターが無い場合の大圏航路での値に比べ**21.1%**小さく、ウェザールーティングにより省エネ効果が向上することを示した。