



第22回 海上技術安全研究所研究発表会



# カーボンニュートラル社会実現のための 省エネデバイスと省エネ船型の開発

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所  
海上技術安全研究所  
流体設計系  
川島 英幹

## はじめに



2018年4月、国際海事機関（IMO：International Maritime Organization）は「船舶からのGHG排出量削減に関する初期戦略」を採択し、2050年までに国際海運からのGHG排出量を少なくとも50%削減し、今世紀中の可能な限り早期にGHG排出量をゼロとすることを目標として掲げている。

その後の地球温暖化問題の深刻化に対応するため、国際海運からの温室効果ガス（GHG）の排出を全体としてゼロとし、2050年にカーボンニュートラルを目指すことがIMOに提案されている。

流体設計系においても、基盤研究「カーボンニュートラル時代の新しい海上輸送システム構築に向けた基礎研究」を実施し、カーボンニュートラルにいたる手法のマップ化を行い、流体分野の課題を確認した。

本講演では、流体設計系で行ったカーボンニュートラル時代に対応するための研究例として、低速幅広肥大船型の開発と内航船向け空気潤滑システムの開発について紹介する。

# 「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」

## ⑦ 船舶産業の工程表



● 導入フェーズ： 1. 開発フェーズ 2. 実証フェーズ 3. 導入拡大・コスト低減フェーズ 4. 自立商用フェーズ

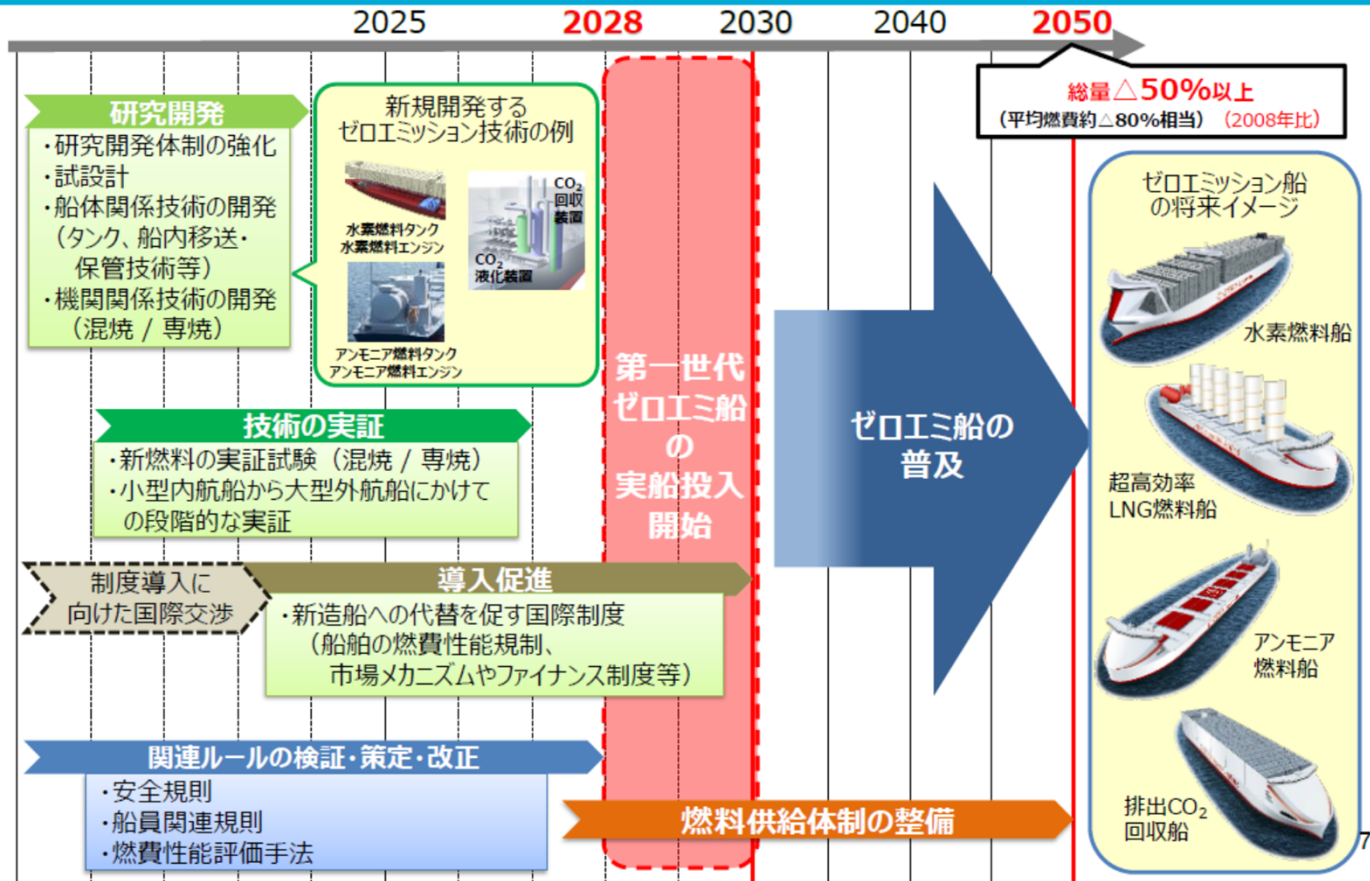
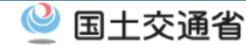
	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	～2030年	～2040年	～2050年
<b>カーボンフリーな代替燃料への転換</b> ● 燃料電池船 ● EV船 ● ガス燃料船	○水素燃料電池船							
		実証				水素燃料電池船 導入拡大	水素燃料電池船 商用的拡大	
	○フルバッテリー船							
		実証				ゼロエミッションEV船 導入拡大	ゼロエミッションEV船 商用的拡大	
	○水素・アンモニア燃料船 ・水素燃料エンジン ・アンモニア燃料エンジン		技術開発		実証	2025年より前に実証開始	水素・アンモニア燃料船 導入拡大	水素・アンモニア燃料船 商用的拡大
		革新的燃料タンク 燃料供給システム	技術開発		実証			
<b>LNG燃料船の効率化</b> ● 技術開発・導入 ● 風力推進等との組み合わせ	○LNG燃料船 ・革新的燃料タンク ・燃料供給システム							
		技術開発						
		水素・アンモニア燃料船にも応用可能		実証		超高効率LNG燃料船 + 風力推進船導入・拡大	超高効率LNG燃料船 + 風力推進船※ 商用的拡大	LNG燃料から再生メタンへ時代に転換
	風力推進							
	技術開発		実証					
								※CO2排出率86%、再生メタン活用でゼロエミッション
<b>枠組の整備</b> ● 新造船 ● 現存船 ● 船社、船主	○新造船							EEDIの更なる規制強化（未定）
	○現存船							EEXI・燃費実績格付け制度の見直し等（未定）
						○船舶、船主等		経済的手法（例：燃料油課金）の導入による研究開発、普及等の促進（未定）
								内航海運の低・脱炭素化に向けた議論を踏まえ必要な制度構築を含めた取組の推進

2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（2021年6月18日：内閣官房、経済産業省、内閣府、金融庁、総務省、外務省、文部科学省、農林水産省、国土交通省）抜粋（船舶産業）（P.6）

# 国際海運のゼロエミッションに向けたロードマップ

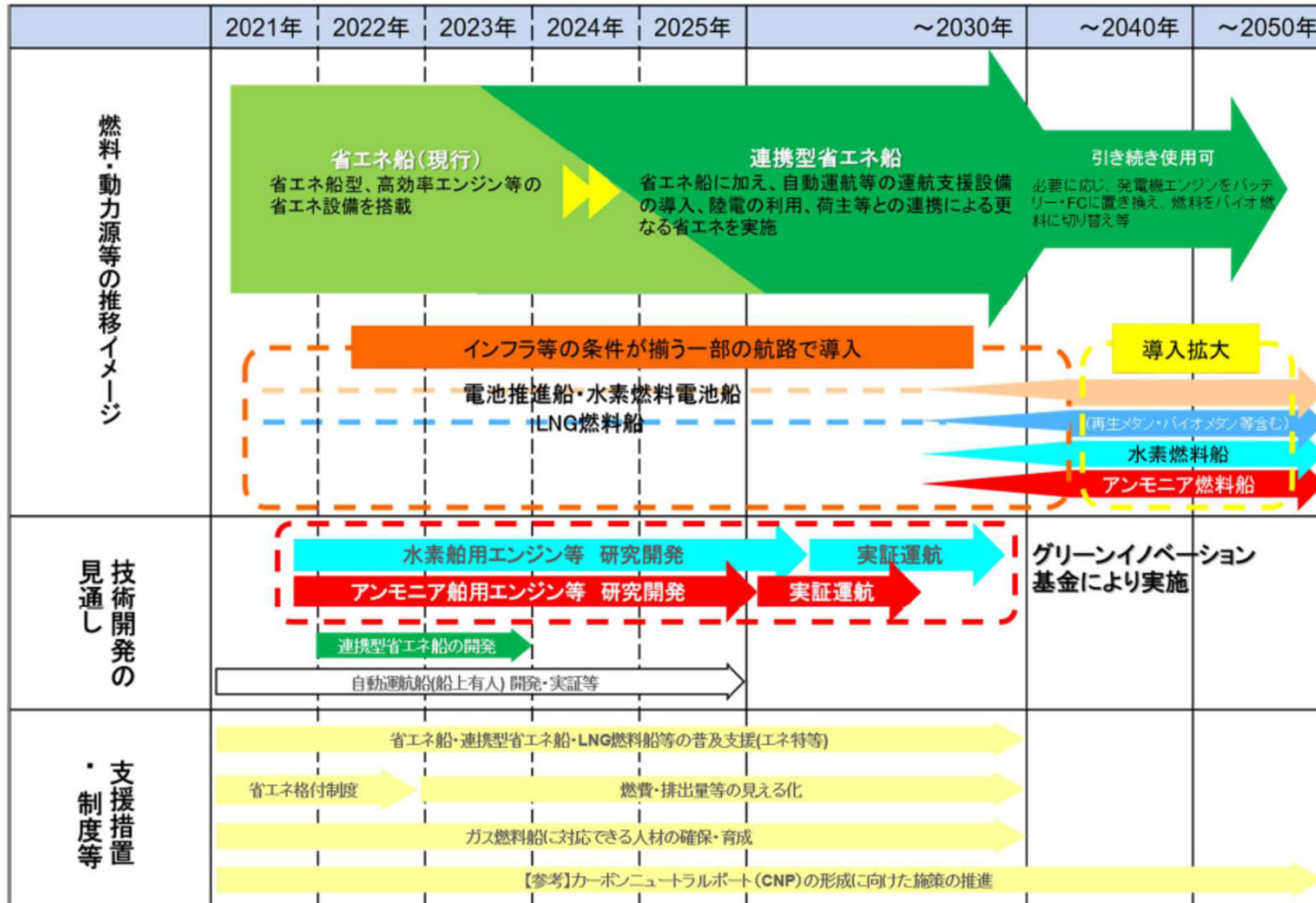


## 国際海運のゼロエミッションに向けたロードマップ



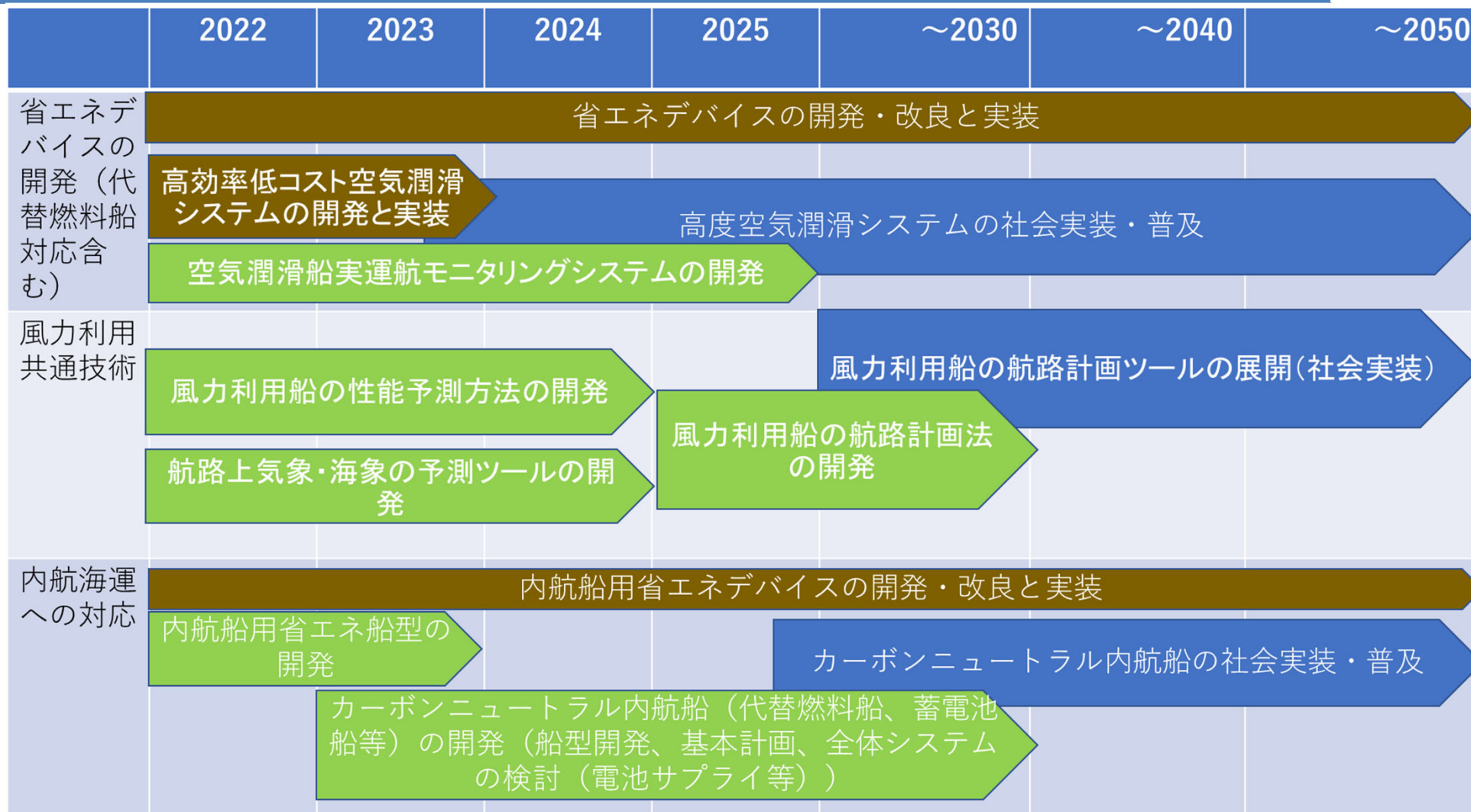
「次世代船舶の開発」プロジェクトの研究開発・社会実装計画（案）について  
(2021年5月24日：国土交通省海事局海洋・環境政策課) (P.7)

# 内航海運の低・脱炭素化に向けたロードマップ



「内航カーボンニュートラル推進に向けた検討会」中間とりまとめ（2021年8月）（P.8～P.9）

# カーボンニュートラル海上物流システム実現のための ロードマップ（海技研流体分野）



# 低速幅広肥大船型による GHG 削減への取り組み

川北 千春, 一ノ瀬 康雄, 深澤 良平, 金井 健, 新郷 将司 :

低速幅広肥大船型による GHG 削減への取り組み, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, (2022)

## 低速幅広肥大船型による GHG 削減への取り組み



カーボンニュートラルな代替燃料の高騰が予想される。  
ゼロエミッション船を海上物流市場に受け入れ可能とするためには、現状船に対し輸送重量・距離あたりの輸送効率を2倍（GHG削減効果50%）以上向上させ、輸送コストの大幅な増加を抑制することが必要である。

従来の延長線上にない画期的な船型の開発が必要

### 低速幅広肥大船の開発

現状の航海速力14-15 knotの肥大船に対し，船速を10 knot以下とする。  
船幅および肥大度を増加  
喫水は変えない  
（喫水を深くした場合，入港可能な港湾が少なくなるため）



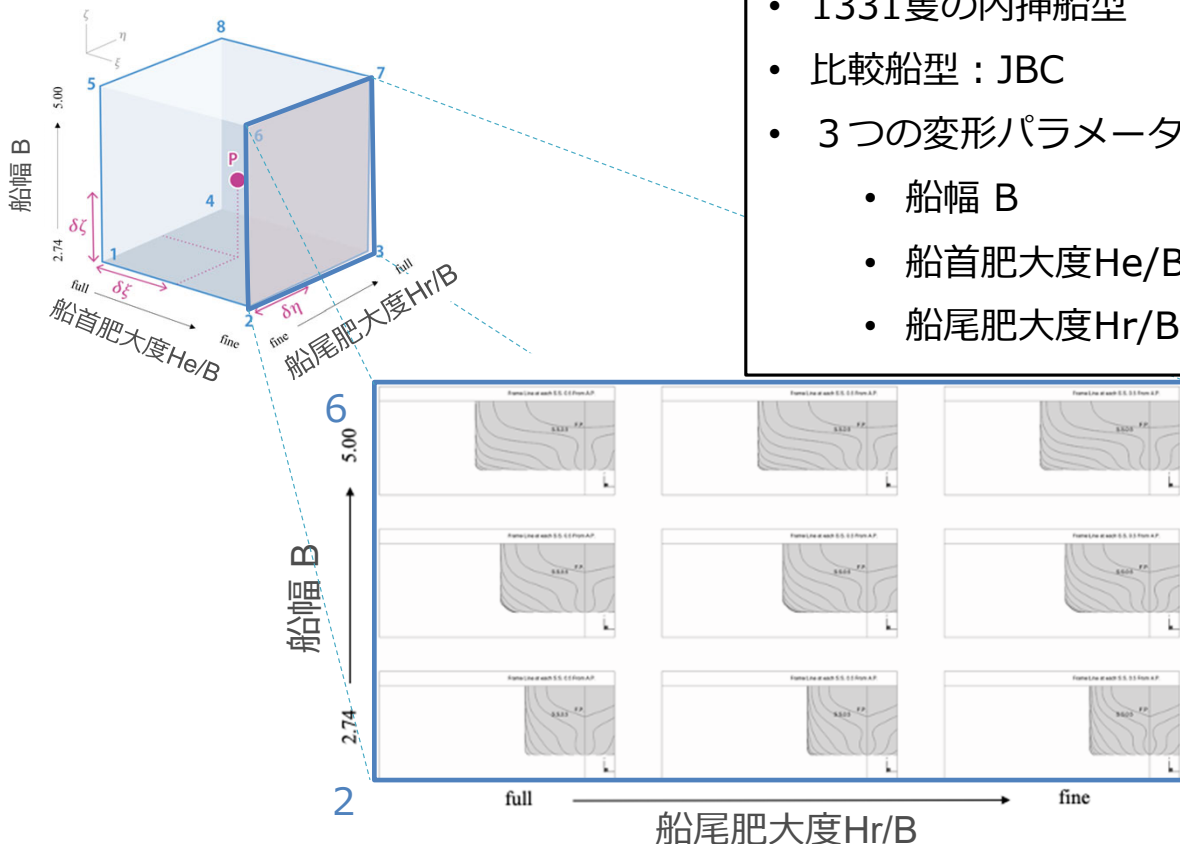
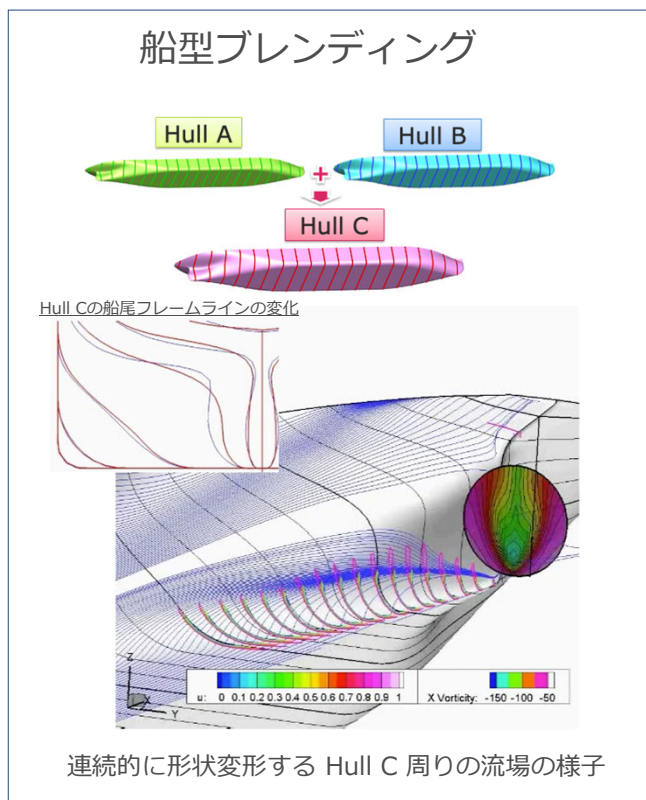
# 船型データベースの計画



## 船型ブレンディング技術\*を用いて船型データベースを構築

データベースのポイント

- 1331隻の内挿船型
- 比較船型：JBC
- 3つの変形パラメータ
  - 船幅 B
  - 船首肥大度  $H_e/B$
  - 船尾肥大度  $H_r/B$

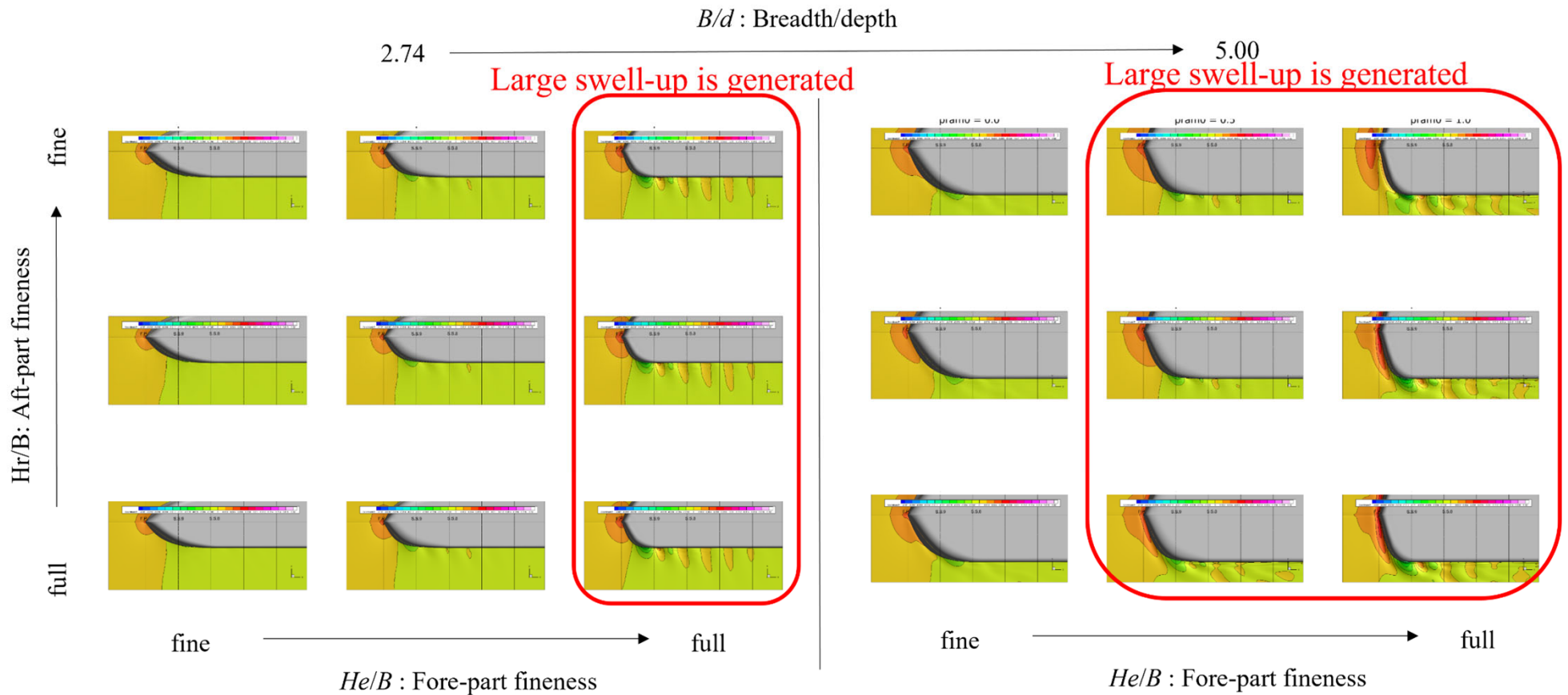


\* 一ノ瀬 康雄ほか：総トン数に制限を有する内航船の船型データベースの構築とその評価：-749 総トン型一般貨物船を対象としたプロトタイプの開発-，日本船舶海洋工学会論文集，第26号pp.51-62，2017.

# 船型データベースの構築と解析



船型データベースにより，極端な性能悪化の起こる設計範囲を定量的に把握可能

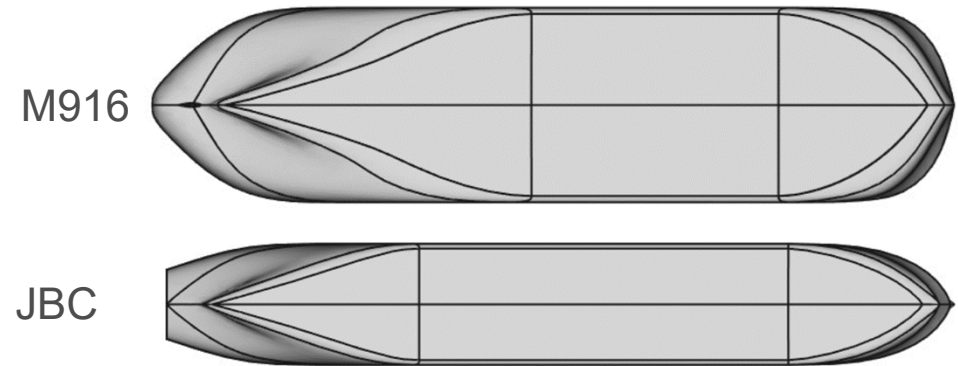


船首造波の波高分布

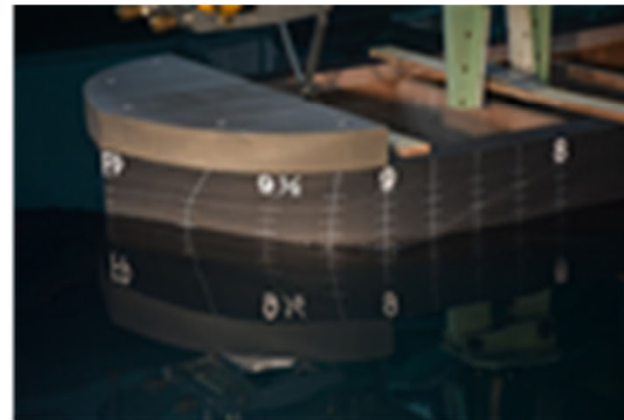
# 水槽試験による推進性能評価



		M916	JBC
L <sub>pp</sub>	m	286.00	280.00
B	m	73.12	45.00
d	m	16.50	16.50
L / B	-	3.91	6.22
B / d	-	4.43	2.73
C <sub>B</sub>	-	0.8323	0.8580
Displacement Δ	ton	294,447	179,092
DW	ton	254,000	158,000
Design Speed	knot	10.0	14.5
DW/DW_JBC	-	1.61	1.00

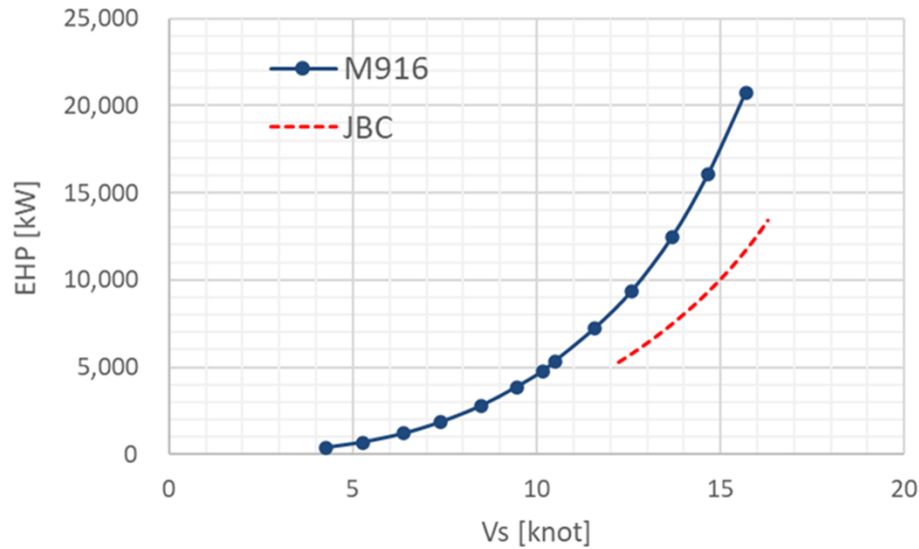


模型船 (M916)  
L<sub>pp</sub>=5.084m,  
B = 1.3m



船首造波の状況 (計画満載状態, 設計船速V<sub>s</sub>=10knot)

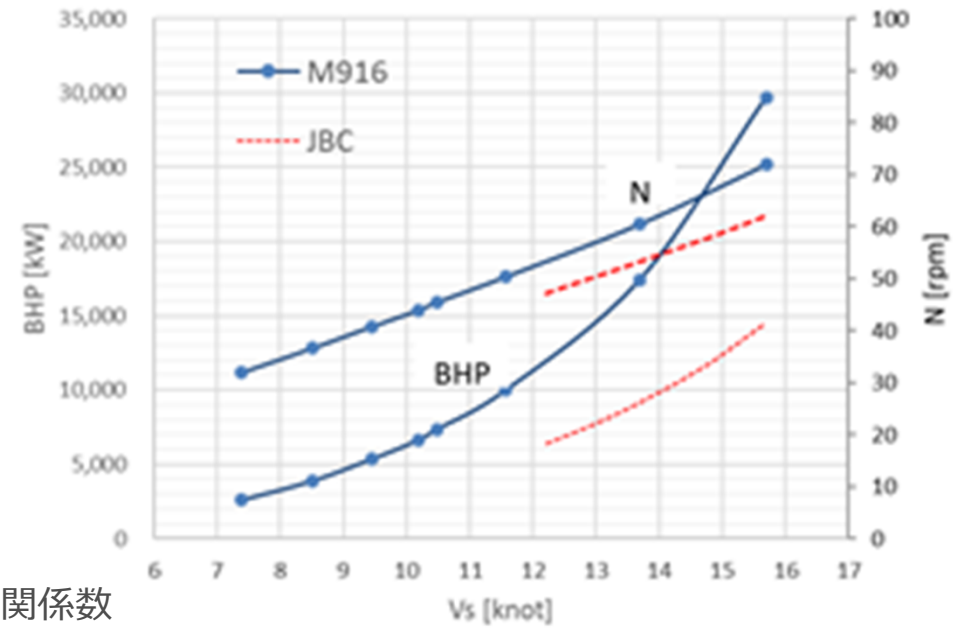
# 水槽試験による推進性能評価



有効動力 (EHP) の比較

自航要素と実船相関係数

	JBC	M916
Form factor, $k$	0.307	0.430
Roughness allowance coefficient, $\Delta C_F$	0.00012	0.00017
Thrust deduction coefficient, $1-t$	0.8071	0.7925
Wake fraction coefficient(model), $1-W_m$	0.4863	0.4443
Wake fraction factor, $\epsilon$	1.1962	1.2953
Wake fraction coefficient(ship), $1-W_s$	0.4065	0.3430
Relative rotative efficiency, $\eta_R$	1.0271	1.0144



制動動力 (BHP) の比較

# 各種燃料の物性と燃料タンク容積の比較



		C重油	天然ガス	液化水素	水素（圧縮気体）		アンモニア
		(液体)	(液体)	(液体)	350 bar	700 bar	(液体)
発熱量	[MJ/kg]	42.7	49.2	121	121	121	22.5
密度	[kg/m <sup>3</sup> ]	900	460	70.8	24.8	39.6	695
体積あたりの	[GJ/m <sup>3</sup> ]	38.4	22.6	8.6	3.0	4.8	15.6
発熱量（重油比）		100%	59%	22%	8%	12%	41%
燃料タンク内容積 （重油比）		1.0	1.7	4.5	12.8	8.0	2.5
燃料タンク容積 （重油比）付帯設備込		1.0	2.1	5.7	19.7	17.7	2.7

# 各種燃料を使用した場合のEEC, GHG, CIIの比較



エネルギー効率およびGHG削減効果を評価

エネルギー効率係数 (Energy Efficiency

Coefficient : EEC) : 新たに定義

$$EEC = BHP / (DW \cdot Vs)$$

GHG排出量

$$GHG / GHG(JBC) = EEC / EEC(JBC)$$

CII (Carbon Intensity Indicator : 平均燃費実績)

$$CII / CII(JBC)$$

$$= EEC / EEC(JBC) \cdot Vs(JBC) / Vs$$

低速幅広肥大船型(M916)は従来船型

(JBC) に対して, GHGで**55%**減, CIIで**35%**減となり, GHGの大幅削減が可能な船型である.

液化水素および液化アンモニアを燃料とした場合, 燃料タンク容積はHFOの場合と比べ, それぞれ**5.7倍**, **2.7倍**.

タンク大型化の影響は, エネルギー効率でそれぞれ**5%**と**3%**の低下に留まる.

		JBC	M916	M916H	M916A
Fuel		HFO	HFO	LH	LA
Service speed, Vs	knot	14.5	10.0	10.0	10.0
Deadweight, DW	ton	158,000	254,000	228,124	244,641
DW/DW(M916)	-	-	1.00	0.90	0.96
Fuel tank volume ratio	-	-	1.0	5.7	2.7
Fuel tank capacity	ton	3,813	5,505	31,381	14,865
BHP	kW	12,585	6,256	6,256	6,256
EEC/EEC(JBC)	-	1.00	0.45	0.50	0.47
GHG/GHG(JBC)	-	1.00	0.45	0.00	0.00
CII/CII(JBC)	-	1.00	0.65	0.00	0.00

M916H : 液化水素燃料、M916A : アンモニア燃料

C重油 : HFO, 液化水素 : LH, 液化アンモニア : LA

## 低速肥大船まとめ



幅，船首肥大度，船尾肥大度の3つの船型パラメータを用いた8つの基本船型を設計し，基本船型を用いて船型ブレンディングにより低速幅広肥大船対応の船型データベースを構築した．CFDを用いた性能分布の評価を行い，設計範囲が定量的に把握可能となった．

従来船型より幅を約1.6倍と大幅に幅広化させたバルブレス船型に対する平水中水槽試験を実施し，低速幅広肥大船型の推進性能評価に必要な計測データを取得した．

本研究で開発した低速幅広肥大船型は従来船であるJBC船型に対して，GHGで**55%減**，CIIで**35%減**となり，GHGの大幅削減が可能な船型であることが明らかとなった．

液化水素および液化アンモニアを燃料とした場合，燃料タンク容積はC重油の場合と比べ，それぞれ**5.7倍**，**2.7倍**となるが，このタンク大型化の影響は，エネルギー効率でそれぞれ**5%**と**3%**の低下に留まる．

# 内航船への空気潤滑システムの適用

JST SBIR フェーズ1支援

「IoT を活用した実海域での省エネ効果モニタリングシステム構築による空気潤滑システムの実用省エネ効果向上の研究」



# 内航船への空気潤滑システムの適用



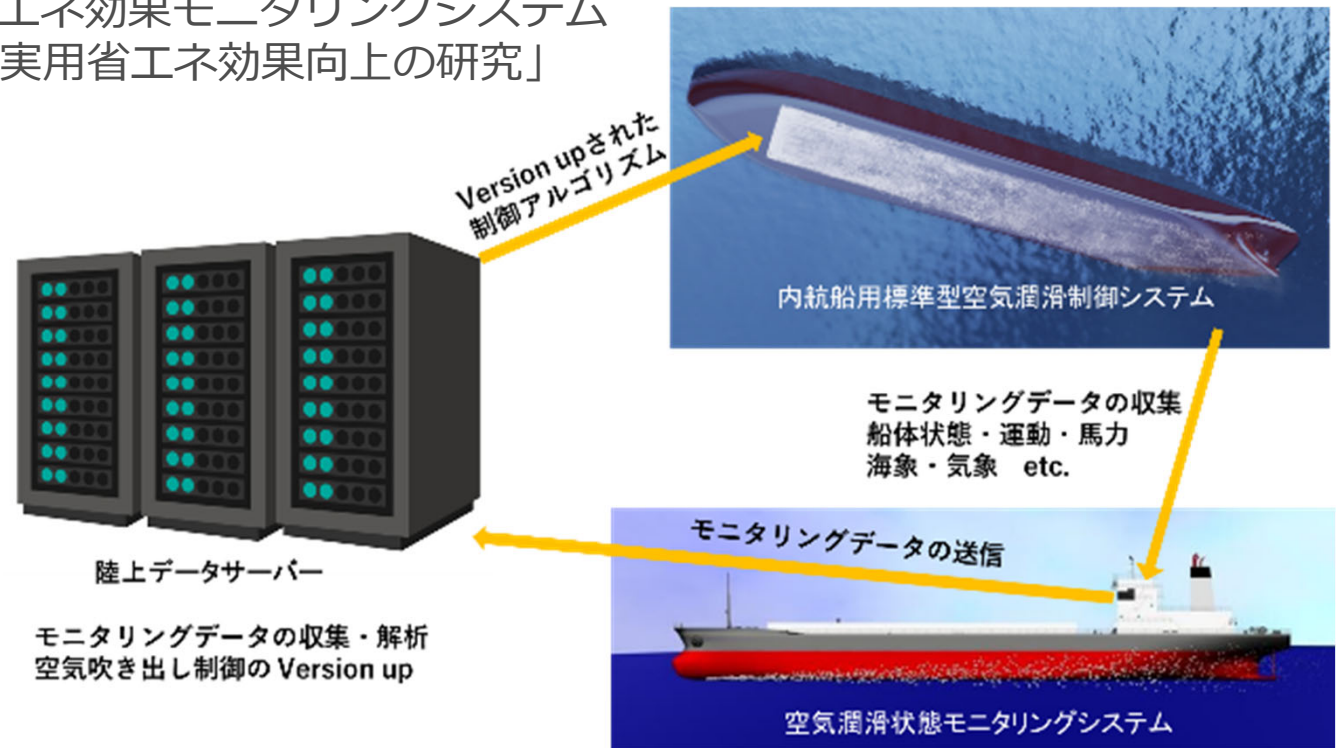
JST SBIR フェーズ1支援  
「IoT を活用した実海域での省エネ効果モニタリングシステム  
構築による空気潤滑システムの実用省エネ効果向上の研究」

内航船を対象に空気潤滑システムを適用.

IoTを活用した実海域での省エネ効果のモニタリングシステムを構築.

船体の状態, 気象海象条件に対応した空気吹き出し制御を実施.

実運航時に5%程度のGHG削減を図ることを目標.

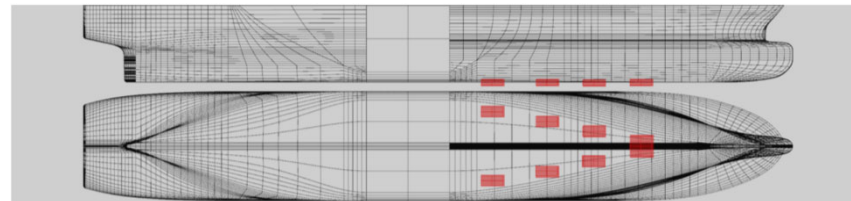


空気潤滑省エネ効果モニタリングシステム概念図

# 空気潤滑システムの概略設計と抵抗低減量の推定



499GT型貨物船を対象として空気潤滑システムの概略設計を行い、抵抗低減量、燃費低減率を検討。空気潤滑状態のCFD計算により摩擦抵抗低減量を推定。



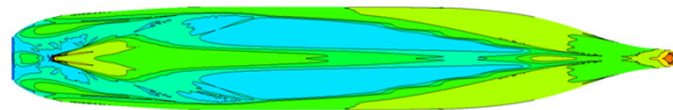
499GT貨物船の船型と吹き出し部の配置



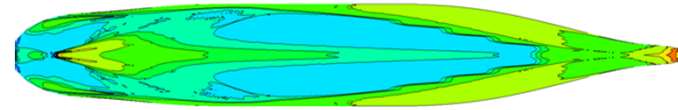
気泡の被覆状態(計画満載状態)



気泡の被覆状態(バラスト状態)



摩擦抵抗係数(計画満載状態)



摩擦抵抗係数(バラスト状態)

空気潤滑状態のCFD計算結果

# 空気潤滑システムによる抵抗低減量・省エネ率推定結果



- CFD計算により摩擦抵抗低減量を推定.
- 空気吹き出しに必要となる容量・揚程を持つプロア, 空気配管による損失を検討し, 実質省エネ率を算定.
- 満載時**3.8%**, バラスト時**11.0%**, 平均で**7.4%**の実質省エネ率が得られると推定.

空気吹き出し方法			連続吹き出し	
状態			満載	バラスト
船速	V	k t s	10.5	10.5
主機出力	BHP	kW	328	335
前部喫水	df	m	3.83	2.16
後部喫水	da	m	4.45	4.00
平均空気膜厚さ	tb	mm	7.0	7.0
所要空気量 (船底部)		m3/min	16.3	16.3
所要空気量 (大気圧)		m3/min	23.3	21.5
<b>抵抗低減率</b>	<b><math>\Delta R/R</math></b>		<b>13.4%</b>	<b>16.8%</b>
荷重度変化によるプロペラ単独効率の変化率			1.024	1.032
<b>名目省エネ率</b>		<b>%</b>	<b>15.4%</b>	<b>19.3%</b>
喫水による水頭		kPa	42.5	31.6
プロア管路損失		kPa	5.0	5.0
吐出圧		kPa	47.5	36.6
総プロア動力		kW	28.2	20.6
総プロア動力 (効率込)		kW	38.1	27.9
空気潤滑時総制動動力	BHPab	kW	316	298
<b>実質省エネ率</b>			<b>3.8%</b>	<b>11.0%</b>

# 空気潤滑効果の増大



- 周期吹き出し法（空気吹き出しを周期的に行う。）により，抵抗低減効果が約**5%**増大する。
- 499GT型貨物船の空気潤滑システムに適用した場合を推定
- 満載時**4.5% (+0.7%)**，バラスト時**11.9% (+0.9%)**，平均で**8.2% (0.8%)**に実質省エネ率が増大。

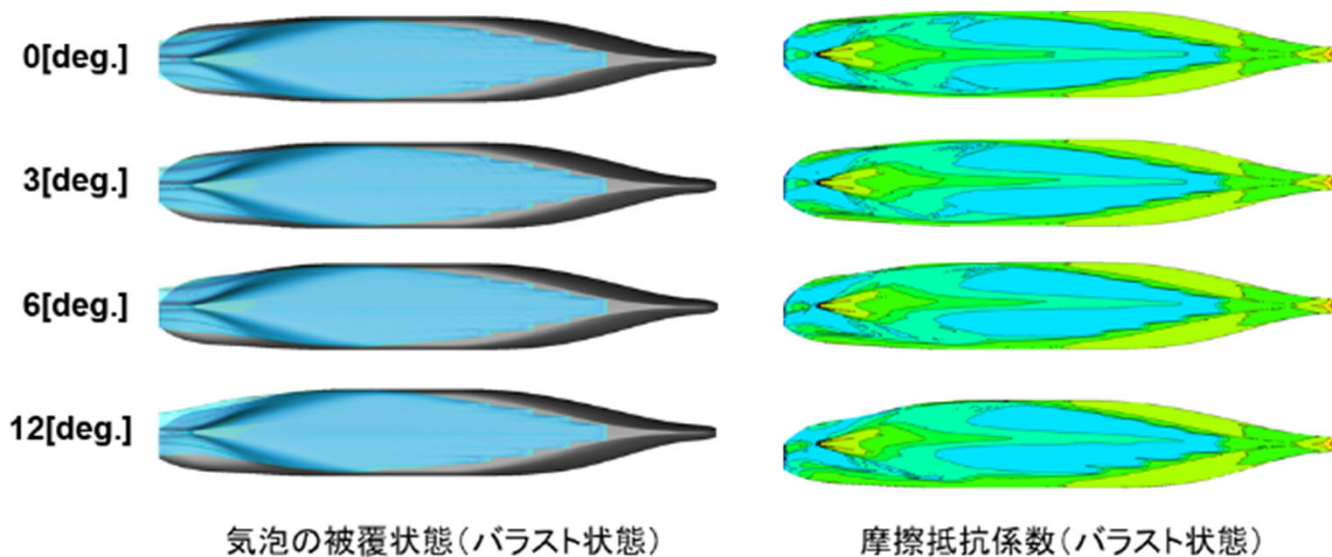
空気吹き出し方法			周期吹き出し	
状態			満載	バラスト
船速	V	k t s	10.5	10.5
主機出力	BHP	kW	328	335
前部喫水	df	m	3.83	2.16
後部喫水	da	m	4.45	4.00
平均空気膜厚さ	tb	mm	7.0	7.0
所要空気量（船底部）		m3/min	16.3	16.3
所要空気量（大気圧）		m3/min	23.3	21.5
<b>抵抗低減率</b>	<b><math>\Delta R/R</math></b>		<b>14.1%</b>	<b>17.6%</b>
荷重度変化によるプロペラ単独効率の変化率			1.026	1.033
<b>名目省エネ率</b>		<b>%</b>	<b>16.2%</b>	<b>20.2%</b>
喫水による水頭		kPa	42.5	31.6
プロア管路損失		kPa	5.0	5.0
吐出圧		kPa	47.5	36.6
総プロア動力		kW	28.2	20.6
総プロア動力（効率込）		kW	38.1	27.9
空気潤滑時総制動動力	BHPab	kW	313	295
<b>実質省エネ率</b>			<b>4.5%</b>	<b>11.9%</b>

# 空気潤滑制御システムの検討



実運航時におけるロール運動の影響を検討するため、横傾斜角をつけた状態での空気潤滑状態のCFD計算を実施。  
横傾斜角0～6度の範囲では数値シミュレーション上は抵抗低減率に変化は少ない。  
横傾斜角12度では、気泡による被覆状態が悪くなり、抵抗低減量が減少するため、吹き出し箇所の制御が効果的である。

横傾斜角	抵抗低減率
0	16.8%
3	16.7%
6	16.8%
12	16.3%



横傾斜時における空気潤滑状態のCFD計算結果

# 空気潤滑状態モニタリングシステムの検討



気象・海象・船体状態・船速によるノイズが大きく実海域での省エネ効果を評価するのは難しい

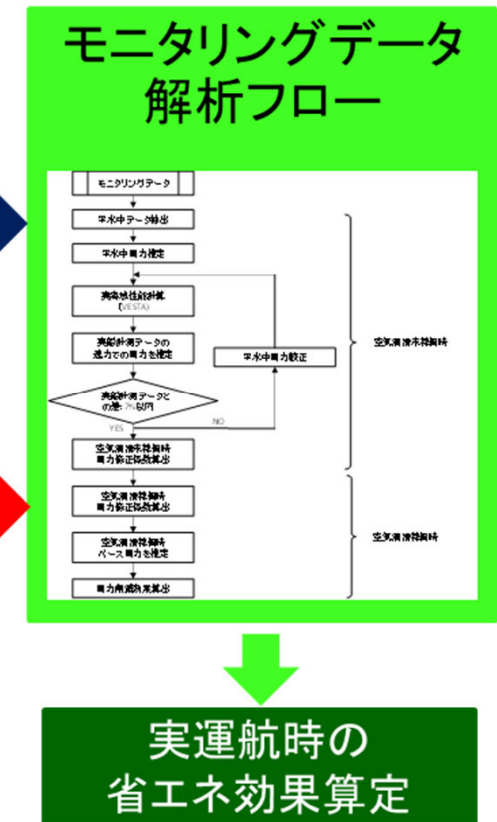
モニタリングシステムを導入すると →

- モニタリングデータと船型パラメータを持ちいて、気象・海象・船体状態・船速等の変化による馬力への影響を除去することで、実海域での空気潤滑システムの省エネ効果を正確に評価。
- 空気吹き出しの制御方法の正確な評価が可能となり、制御システムのブラッシュアップが可能。
- GHG排出量の実削減量のトレースが可能となり、空気潤滑システムによるGHG削減の有効性が実証的に評価可能となる。

モニタリングデータ  
喫水、本船位置、方位、対水速度、主機回転数/出力、ブロー出力、気象庁波浪推算データ

船型パラメータ

$L_{FP}$	m	length between fore position of water line and A.P./aft position of water line; $L_{FP}$
$L_{OA}$	m	length overall ( $L_{OA} \geq L_{OL}$ ); $L_{OA}$
$B_{max}$	m	maximum breadth; $B_{max}$
$d_{mid}$	m	draft at midship; $d_{mid}$
$d_{aft}$	m	draft at aft; $d_{aft}$
$d_{fore}$	m	draft at fore; $d_{fore}$
$L_A$	m	overhanging length at aft; $L_A$
$k_{yy}/L_{FP}$	-	nondimensional radius of gyration; $k_{yy}/L_{FP}$
$X_G$	m	longitudinal position of the center of gravity (+ means fore from midship); $X_G$
$C_b$	-	block coefficient; $C_b$
$C_{wp}$	-	prismatic coefficient of aft part (from midship to A.P.); $C_{wp}$
$C_{wa}$	-	water plane area coefficient of aft part (from midship to A.P.); $C_{wa}$
$C_{vp}$	-	vertical prismatic coefficient; $C_{vp}$
$A_T$	m <sup>2</sup>	projected transverse area above water line; $A_T$
$A_L$	m <sup>2</sup>	projected lateral area above water line; $A_L$
$A_{CO}$	m <sup>2</sup>	projected lateral area of superstructure and cargos on deck (e.g. containers); $A_{CO}$
$CdS$	m	distance from the midship section to the center of projected lateral area (+ means fore from midship); $CdS$
$H_{BR}$	m	height to bridge top from water line; $H_{BR}$
$H_C$	m	height to center of $A_L$ from water line; $H_C$



## 内航船用空気潤滑まとめ



499GT型貨物船を対象に、空気潤滑システムの概略設計を行い、省エネ効果と燃費節減効果の検討を行い、満載時**3.8%**、バラスト時**11.0%**、平均で**7.4%**の実質省エネ率が得られた。

周期吹き出しを適用すると、満載時**4.5%**、バラスト時**11.9%**、平均で**8.2%**に実質省エネ率が增大すると見込まれた。

実海域での省エネ効果を確保するための空気潤滑の制御法について検討するため、横傾斜状態でのCFD計算を行い、横傾斜角が変化した場合の摩擦抵抗低減率を評価した。

空気潤滑状態モニタリングシステムを構築することで、空気潤滑システムの省エネ効果に対する気象・海象・船体状態等による影響を排除でき、空気吹き出しの制御方法による実海域での省エネ効果の違いの正確な評価が可能となり、実海域での省エネ効果の増大を図ることができる。

## まとめ



海上技術安全研究所の流体分野として検討すべき課題について検討を行い、カーボンニュートラル海上物流システム実現のためのロードマップを作成した。

ゼロエミッション燃料が導入されると、燃料費が従来の数倍になることが見込まれ、経済性を確保するためには、従来船型の2倍の輸送効率の船型が必要となる。そこで、ゼロエミッション船として経済的に成立可能な性能を持つ低速幅広肥大船型を開発した。

内航船向け空気潤滑システムの開発では、499GT型貨物船を対象に、空気潤滑システムの概略設計と省エネ効果の検討を行い、実海域での省エネ効果を確保するための空気潤滑の制御について検討し、実海域における空気潤滑システムの省エネ効果を評価できるモニタリングシステムの構成を提案した。



ご静聴有難うございました。



国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所  
**海上技術安全研究所**  
National Maritime Research Institute

