

## 9 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

川島 英幹\*

### **Development of energy-saving devices and hull forms for realizing a carbon-neutral society**

by

KAWASHIMA Hideki

#### Abstract

The worsening of global warming has made it an urgent issue for maritime logistics systems to become carbon neutral. Thus, we have studied the issues that need to be considered in the area of fluid dynamics and created a roadmap for the realization of a carbon-neutral maritime logistics system. Fluids Engineering & Hull Design Department has developed a slow wide blunt ship and an air-lubrication system for coastal vessels to meet the needs of the carbon-neutral era. Zero-emission vessels, which are expected to cost several times more than conventional vessels in terms of fuel costs, require a hull form with twice the transport efficiency of conventional vessels. The developed slow wide blunt vessel differs greatly from the current blunt vessels, but the evaluation results show that it is feasible as an economical zero-emission vessel. To develop an air-lubrication system for coastal vessels, we also devised a basic plan for a standard air-lubrication system, a control system to ensure energy conservation in actual seas, as well as a monitoring system to evaluate energy-saving effects and improve control methods. The results showed that the effects of energy and fuel conservation can be obtained even for small coastal vessels, and that controlling air blowout seems to be effective in the roll motion in actual sea conditions. Lastly, we propose the necessary components for an air-lubrication condition monitoring system to accurately evaluate energy-saving effects in actual seas.

---

\* 流体設計系

原稿受付 令和 4年 5月 12日

審査日 令和 4年 5月 27日

### 1. 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。そして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。また内閣官房、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、国土交通省において、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」<sup>1)</sup>が策定され図-1に示す工程表が示されている。国土交通省においては、「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<sup>2)</sup>が実施され、図-2の「国際海運のゼロエミッションに向けたロードマップ」が示され、「内航カーボンニュートラル推進に向けた検討会」<sup>3)</sup>では図-3に示す「内航海運の低・脱炭素化に向けたロードマップ」が提示されている。このように海事分野におけるカーボンニュートラル化は、喫緊の課題となっている。



図-1 「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<sup>1)</sup>

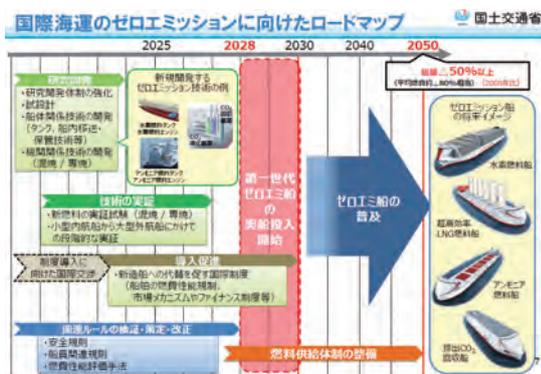


図-2 国際海運のゼロエミッションに向けたロードマップ<sup>2)</sup>



図-3 内航海運の低・脱炭素化に向けたロードマップ<sup>3)</sup>

流体設計系においても、令和三年度に、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海上物流の実現のため、どのような貢献していくべきか検討した。その際、カーボンニュートラルにいたる手法のマップ化を行い、流体分野として、以下の課題があることを確認した。

代替燃料の実用化研究は既に相当進んでおり、かなり早い段階で代替燃料への切り替えが進むことが予測できる。一方、どの代替燃料が主流になっても、単位発熱量当たりのコストは、現在使用されている燃料である重油の数倍となるので、経済上の観点から、省エネデバイスや省エネ船型の開発のニーズは、むしろ高くなることが予測できる。

風力の利用（風力アシスト・風力推進）が、多種多様な方法で、いろいろな機関が研究開発している。風力利用の場合、個別の手法の開発も必要であるが、風力利用船の性能予測や、気象・海象条件の予測、風力アシスト船の航路計画法が風力利用の推進においては、特に重要な要素であり、海技研の流体分野の強みを生かせる研究課題であると考えられる。

内航船のカーボンニュートラル化は、我が国のタスクであるため、内航船用の省エネデバイスの開発、カーボンニュートラル内航船（代替燃料船、蓄電池船等）の開発（基本計画や船型開発、全体システムの検討）等を研究していく必要がある。

これらの検討結果を踏まえて、図-4に示す「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。

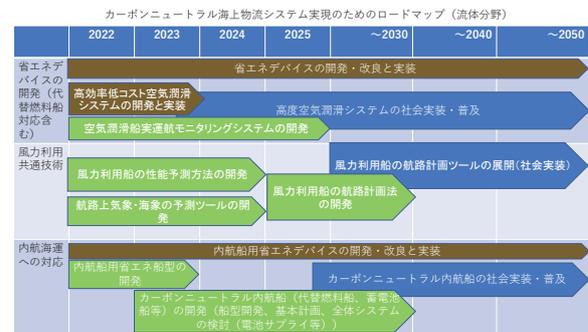


図-4 カーボンニュートラル海上物流システム実現のためのロードマップ（海技研流体分野）

これらの背景のもと、本稿では、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。

**2. 低速幅広肥大船型による GHG 削減への取り組み**

海上技術安全研究所では、重点研究「実海域実船性能評価に関する研究」の中で低速幅広肥大船型による GHG 削減の研究<sup>4)</sup>を実施している。本項では、その成果を紹介する。

カーボンニュートラル時代に必要とされるゼロエミッション船は、燃料に水素やアンモニアを使用する必要があり、現在使用されている燃料である重油の数倍のコストになると予想されている。また、燃料タンク容積は従来の重油タンクと比べ冷却のための付帯設備を考慮すると 2.5~6 倍程度の大きさになる。このため、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%）以上に向上させる必要があり、輸送重量・距離あたりの輸送効率を 2 倍以上向上させることは、船舶を大型化かつ低速化すれば達成可能<sup>5)</sup>であるが、港湾や運河等の制限により、船舶の大きさには制限がある。特に、喫水を深くすることは困難と考えられる。

そこで、ゼロエミッション船実現のため、喫水は従来船型と変えず、船幅および肥大度の増加により載貨重量を増加させ、現状の航海速度 14-15 knot を、10 knot 以下に低速化することで、現状船に対し輸送重量・距離あたりの輸送効率を 2 倍以上に向上させることを目標に、低速幅広肥大船の開発・評価を行った。

今回開発を行った低速幅広船型の要目は、現状の船型データベースにおいては、外挿の範囲に存在する。そのため低速幅広船型を検討するための船型データベースを構築した。

船型データベースは、船型ブレンディング<sup>5)</sup>技術を用いて構築した。船型ブレンディングでは、複数の船型の形状ベクトルを参照し、それらを内挿して船型を生成する。従って、参照する船型（基本船型）のパラメータが、データベース船型の設計空間の外端になる。データベースを構築する際の船型パラメータとして、幅、船首肥大度、船尾肥大度の 3 つを用いる。そのため、基本船型として 3 つのパラメータがそれぞれ最大、最小となるような 2×2×2 の 8 船型を生成した。生成した 8 つの基本船型を基に、船型ブレンディングを行い、1331 の内挿船型の船型データベースを構築し、CFD を用いて性能分布の解析を行なった。

模型船を製作する船型は、従来の研究実績のない表-1 の船型（M916）を採用した。模型プロペラ直径  $D_p$  は、データベース作成時と水槽試験に使用した代用プロペラで異なる。

表-1 模型船 M916 の主要寸法<sup>4)</sup>

	Model	Ship
$L_{pp}$ [m]	5.084	286.00
$B$ [m]	1.300	73.13
$d$ [m]	0.293	16.50
$C_B$ [-]	0.829	0.829
$D_p$ [m] Database	0.178	10.00
$D_p$ [m] Tank Test	0.185	10.41

M916 は比較対象とする JBC<sup>6)</sup>に対して喫水は同一として、船幅は 1.62 倍、載貨重量 (DW) は 1.61 倍、船首尾肥大度 ( $L/B(1-C_B)$ ) の逆数は 1.35 倍とした幅広肥大船型である。M916 と JBC の主要目を比較して表-2 に示す

表-2 JBC と M916 の主要目<sup>4)</sup>

		JBC	M916
Design Speed	knot	14.5	10.0
Design Fr ( $L_{pp}$ )	-	0.142	0.097
Length between perpendiculars, $L_{pp}$	m	280.0	286.0
Waterline length, $L_{wl}$	m	285.0	291.0
Displacement, $\Delta$	ton	182880.6	294446.5
Wetted surface area, $S$	m <sup>2</sup>	19720.4	26830.6
Breadth, $B$	m	45.0	73.1
Draught, $d$	m	16.5	16.5
Block coefficient, $C_B$	-	0.8580	0.8323
Deadweight, $DW$	ton	158,000	254,000
DW/DW (JBC)	-	1.00	1.61
$B/d$	-	2.73	4.43
$L/B(1-C_B)$	-	0.884	0.656

M916 を対象として、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。水槽試験の様子を図-5 に、自航要素と実船相関係数を表-3 に、有効動力を図-6 に、制動動力とプロペラ回転数を図-7 に示す。



図-5 水槽試験における低速肥大船の造波の様子 (10kt)<sup>4)</sup>

表-3 自航要素と実船相関係数<sup>4)</sup>

	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

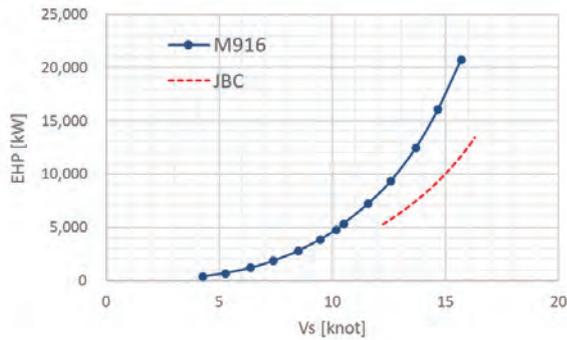


図-6 M916 と JBC の有効動力の比較<sup>4)</sup>

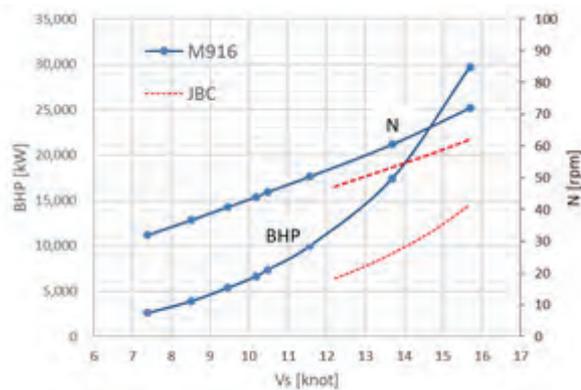


図-7 M916 と JBC の制動動力の比較<sup>4)</sup>

低速幅広船型 M916 のエネルギー効率および GHG 削減効果の評価した。C 重油に変わる代替燃料として考えられているカーボンフリー燃料である液体水素、圧縮水素、液体アンモニアおよび比較のための C 重油、天然ガスの物性値および燃料タンク容積を表-4に示す。燃料タンク容積（重油タンク比）は、熱効率が同一の動力源を使用するとして試算した。液体水素、アンモニアなどの代替燃料を使用する場合のタンク寸法は、従来の重油タンクと比べて、付帯設備を考慮すると液体燃料では 2.7 倍～5.7 倍、圧縮水素まで考慮すると最大 20 倍程度の大きさになる。

表-4 各種燃料の物性と燃料タンク容量<sup>4)</sup>

	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
液化温度 [°C]	-	-161 (約0.1MPa)	-253 (約0.1MPa)	(35MPa)	(70MPa)	(0.857MPa)
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
燃料タンク形式	方形	方形/球形	二重殻円筒	Type I	Type IV	方形/球形
内容積/外体積比	0.98	0.8	0.77	0.64	0.44	0.9
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

カーボンフリー燃料を 100%使用すると、CO<sub>2</sub> 排出量はゼロであり、GHG 排出量や CII (Carbon Intensity Indicator : 平均

燃費実績) はゼロとなってしまう。このため、(1)式に示すエネルギー効率係数 (Energy Efficiency Coefficient : EEC) を定義した。さらに、C 重油を燃料とする JBC に対する GHG や CII の比率は、波風の影響を同一と仮定すると、(2)式および(3)式に示す通りとなる。

$$EEC = BHP / (DW \cdot V_s) \tag{1}$$

$$GHG / GHG(JBC) = EEC / EEC(JBC) \tag{2}$$

$$CII / CII(JBC) = EEC / EEC(JBC) \cdot V_s(JBC) / V_s \tag{3}$$

M916 の燃料を液化水素としたものを M916H、アンモニアとしたものを M916A と呼ぶ。それぞれの船舶に対する DW、燃料タンク容積、航海速度における BHP および JBC に対する M916、M916H、M916A の EEC、GHG、CII の比を比較した。結果を表-5に示す。なおカーボンフリー燃料使用による燃料タンクの大型化の影響は、DW の減少として考慮した。

表-5 各種燃料を使用した場合の EEC、GHG、CII の比較<sup>4)</sup>

	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

LH : Liquid Hydrogen, LA : Liquid Ammonia

M916 船型は、C 重油を燃料とした M916 の場合でも、従来船型の JBC に対して、EEC・GHG を 55%削減、CII を 35%削減と、GHG の大幅な削減が可能であり、低速幅広肥大船型が GHG 削減に有効であることが明らかになった。ま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 HFO の場合と比べ、それぞれ 5.7 倍、2.7 倍となり、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%の悪化となることがわかった。

### 3. 内航船への空気潤滑システムの適用

続いて、内航船への空気潤滑システムの適用を検討した例として、JST SBIR フェーズ 1 支援において実施した「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」を紹介する。

本研究では、内航船に搭載した空気潤滑システムの実用省エネ効果を向上させるため、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 (図-1 参照) を構築し、得られたモニタリングデータに基づき、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行う空気潤滑システム

の研究を行った。このシステムにより、従来の内航船に比べて、実運航時に5%程度のGHG削減を図ることを目標とした。

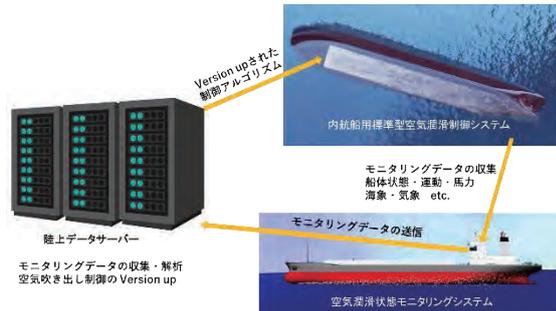


図-8 空気潤滑省エネ効果モニタリングシステム概念図

### 3.1 空気潤滑システムの概略設計

一般的な内航船、具体的には、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、空気吹き出し部の設置位置、空気供給装置の仕様、空気潤滑システムの概略設計を行い、期待できる抵抗低減量、燃費低減率を検討した。

空気潤滑時の摩擦抵抗低減量は、CFDによる気泡流計算の結果から推定した。気泡流計算用のCFDコードとしてANSYS Fluentを用いた。ANSYS Fluentのユーザー定義関数(UDF)機能とユーザスカラー輸送方程式(UDS)機能を用いて、気泡流モデルと摩擦抵抗低減モデルを導入し、空気潤滑状態のCFDを可能にしたものを使用した。

図-9に空気吹き出し部の配置と、CFDのための計算格子を、図-10にCFDによる空気潤滑状態の計算結果を示す。

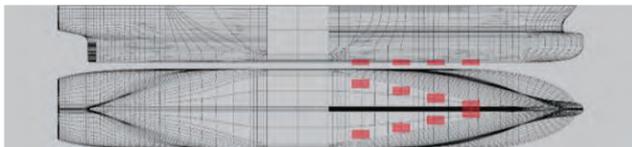


図-9 空気吹き出し部の配置とCFD用計算格子

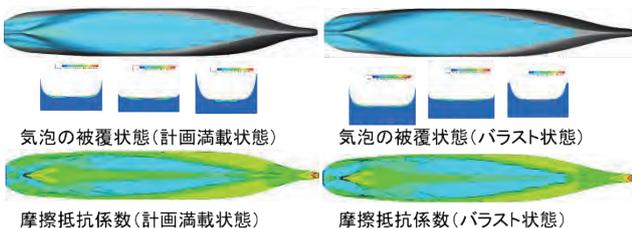


図-10 空気潤滑状態のCFD計算結果

推定された摩擦抵抗低減量から空気潤滑状態における制動力を求めた。また空気吹き出しに必要な容量・揚程を持つブロー、空気配管による損失を検討して、ブローによる空気吹き出しに必要な動力を算定した。これらの結果から、実質省エネ率を求め、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された。さらに海技研で開発中の周期吹き出し法を適用した場合の実質

省エネ率を算定すると、満載時で4.5%、バラスト時11.9%、平均で7.4%の実質省エネ率が得られるという結果を得た。空気潤滑による省エネ効果推定結果を表-6に示す。

表-6 空気潤滑による省エネ効果推定結果

空気吹き出し方法		連続吹き出し		周期吹き出し	
		満載	バラスト	満載	バラスト
状態		85%	85%	85%	85%
主機負荷					
船速	V	kt	10.5	10.5	10.5
主機出力	BHP	kW	328	335	328
前部喫水	df	m	3.83	2.16	3.83
後部喫水	da	m	4.45	4.00	4.45
船体抵抗	R	kgf	4,572	4,666	4,572
平均空気膜厚さ	tb	mm	7.0	7.0	7.0
所要空気量(船底部)	Q	m <sup>3</sup> /min	16.3	16.3	16.3
所要空気量(大気圧)	Q	m <sup>3</sup> /min	23.3	21.5	23.3
抵抗低減率	$\Delta R/R$	%	13.4%	16.8%	14.1%
抵抗低減量	$\Delta R$	kg	613	784	643
抵抗比	rr		0.866	0.832	0.859
プロペラ荷重係数CT	Ct		1.340	1.406	1.340
空気吹き出し時の荷重係数CT	Ct		1.161	1.170	1.152
荷重変化分の $\eta_o$ の変化率	$r\eta_o$		1.024	1.032	1.026
所要馬力	BHPa	kW	278	270	275
名目省エネ率	e	%	15.4%	19.3%	16.2%
喫水による水頭		kPa	42	32	42
ブロー空気量	Qb	m <sup>3</sup> /min	23	21	23
ブロー管路損失	dP	kPa	5.0	5.0	5.0
吐出圧(kPa)		kPa	47	37	47
総ブロー馬力			28	21	28
総ブロー馬力(効率込)	AHP	kW	38	28	38
最終所要馬力	BHPab	kW	316	298	313
実質省エネ率	e	%	3.8%	11.0%	4.5%

空気潤滑システムの概略設計から得られた省エネ効果の推定結果を用いて、以下の条件で節減燃料費の算定を行った。

#### 節減燃料費計算条件

- 年間稼働率50% (4,380時間)
- 満載航海時3.8%、バラスト航海時11.0%の省エネ効果が得られ、満載航海とバラスト航海の割合は半々であるとする。
- 主機燃費率：195g/kwh
- A重油価格：81,700円/kl (2021年10月-12月価格)
- A重油比重：0.86
- A重油単位当たり二酸化炭素排出量：2.71kg/l

#### 算定結果

年間節減燃料費：2,000,657円  
 年間CO<sub>2</sub>排出削減量：66.4t

今後、海運部門のカーボンニュートラル化が進み、代替燃料への更新が進むと燃料コストは高くなる見込まれている。代替燃料として有望視されているアンモニアの場合、単位熱量当たりで比較してA重油の約2倍のコスト増になると推計されている。その場合、年間で約400万円の燃費が節減できる。

### 3.2 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による空気潤滑への影響を検討するため、空気潤滑状態のCFD計算を行った。計算は静的な横傾斜状態を対象に行った。図-11にCFD計算結果を、表-7に抵抗低減率の変化を示す。横傾斜角0~6度の範囲では抵抗低減率に変化は少なかった。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と考えられる。

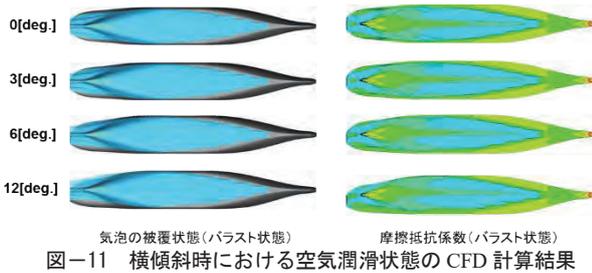


図-11 横傾斜時における空気潤滑状態のCFD計算結果

表-7 横傾斜時における抵抗低減率

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

### 3. 3 空気潤滑状態モニタリングシステムの検討

空気潤滑による省エネ効果への船体状態、気象海象の影響を評価できる空気潤滑状態モニタリングシステムの構成要件を検討した。モニタリングデータと船型パラメータを用いて、気象・海象・船体状態・船速等の変化による馬力の変化を補正することで、空気潤滑システムによる省エネ効果を正確に評価できるようにした。空気潤滑状態モニタリングシステムのシステム構成を図-12に示す。

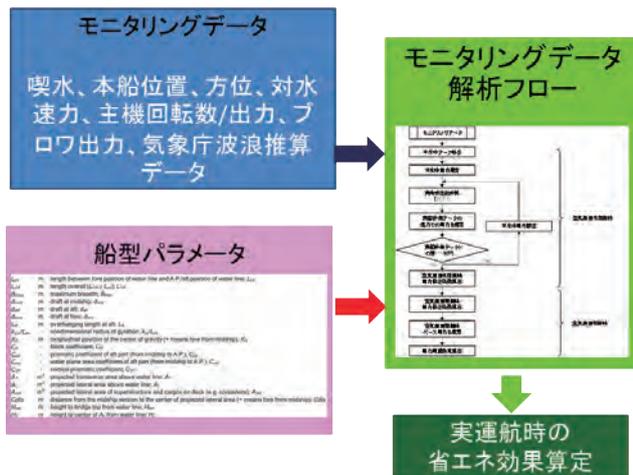


図-12 空気潤滑状態モニタリングシステム構成

本システムを用いることにより、空気吹き出しの制御方法の評価を行うことが可能となり、日々取得されるモニタリングデータを陸上データサーバーで解析することで、制御システムのブラッシュアップを図ることができる。また、本モニタリングシステムを用いて、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削減の有効性を実証的に評価することが可能となる。

### 5. まとめ

地球温暖化の深刻化により、海上物流システムのカーボンニュートラル化への対応が喫緊の課題となっている。そこで、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。

流体設計系では、カーボンニュートラル時代に対応するため研究として、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を行っている。

燃料費が従来の数倍になることが見込まれるゼロエミッション船においては、従来船型の2倍の輸送効率の船型が求められている。開発した低速幅広肥大船型は、現状の肥大船とかけ離れた要目を持つが、評価の結果、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ことが明らかになった。

内航船向け空気潤滑システムの開発では、内航船のGHG排出削減のため、内航船用の標準的な空気潤滑システムの概略設計、実海域での省エネ効果を確保する制御システムの検討、省エネ効果を評価し、制御法の改善を図るためのモニタリングシステムの検討を行った。その結果、内航船においても実用的な省エネ効果と燃費節減効果が得られること、実海域におけるロール運動においては空気吹き出しの制御に効果がみられそうなことが判った。また実海域における省エネ効果を正確に評価するための空気潤滑状態モニタリングシステムに必要な構成要素を提案した。

### 謝辞

本研究の一部は、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」として実施しました。深く感謝申し上げます。

### References

- 1) 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（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）（2021）
- 2) 「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（国土交通省海事局海洋・環境政策課）（2021）
- 3) 「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）
- 4) 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)
- 5) 一ノ瀬 康雄，田原 裕介，久米 健一：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(2017) pp.51-62.
- 6) 海上技術安全研究所：Tokyo2015 ウェブサイト，<http://t2015.nmri.go.jp/jbc.html>，(2015)
- 7) Arakawa, D., Kawashima, H., Kawakita, C.: Numerical Estimation of Self-propulsion Factors for Ship with Air Lubrication, Proceeding of ISOPE 2018, (2018)