

ゼロエミッション実現に向けたコンセプト船の検討 －低速幅広肥大船の開発と経済性評価－

高橋 千織*, 久米 健一*, 川北 千春**, 拾井 隆道**, 新川大治朗*,
仁木 洋一*, 新田 好古*, 小坂 浩之*, 安達 雅樹*,
和中真之介*, 和田祐次郎*

Design of Slow and Wide Bulk Carrier Aimed at Zero Emissions and Evaluation of Economic Impact

by

TAKAHASHI Chiori*, KUME Kenichi*, KAWAKITA Chiharu**, HIROI Takamichi**,
ARAKAWA Daijiro*, NIKI Yoichi*, NITTA Yoshifuru*, KOSAKA Hiroyuki*, ADACHI Masaki*,
WANAKA Shinnosuke*, WADA Yujiro*

Abstract

The momentum towards reducing GHG emissions has been growing globally in recent years. The International Maritime Organization (IMO) revised the GHG reduction strategy at the 80th Marine Environment Protection Committee (MEPC 80) held in July 2023. A zero-emission or zero-emission ready ship, which reduces emissions by more than 80–90% compared with a conventional ship, should be developed and introduced to the shipping market by 2030 to achieve the target reduction in GHG emissions from international shipping. Such a ship will need innovative technologies to use alternative and renewable energy sources efficiently.

In this study, an economic evaluation was carried out using a zero-emission ship, which is an innovative wide bulk carrier that assumes a lower design speed than current ships and has a transport efficiency more than twice that of conventional ships. This hull form was selected from a selection of hull forms generated by a blending method using the Japan Bulk Carrier as the basic hull form. Although further studies are needed to optimize the propulsion performance, the results showed that the breadth can be increased beyond the conventional limits if low-speed operations are assumed. Moreover, the economic impacts of introducing a slow and wide-blunt ship were evaluated using the operational configuration of a Capesize bulk carrier on the Japan-Australia route. The analysis showed that this low-speed, wide-blunt ship is more competitive than conventional vessels, especially when using alternative fuels.

* GHG削減プロジェクトチーム, ** GHG削減プロジェクトチーム(研究当時)

原稿受付 令和6年5月17日

審査日 令和6年6月3日

目 次

1. まえがき	3
2. 2050 年カーボンニュートラルに向けた取り組み	3
3. 低速幅広コンセプト船の検討	7
3.1 概要	7
3.2 船型の検討	7
3.3 推進性能評価	8
3.4 最低推進出力評価と主機の決定	10
3.5 まとめ	11
4. 低・脱炭素燃料利用の検討	11
4.1 概要	11
4.2 低・脱炭素燃料利用技術の開発状況と低速幅広船型への利用を検討する燃料	11
4.3 燃料タンク容積の推計	13
4.4 燃料タンク配置の検討	14
4.5 まとめ	14
5. 低速幅広船の経済性評価	15
5.1 概要	15
5.2 既存研究の内容と本研究の位置付け	15
5.3 対象とするケープサイズバルクキャリアの運航特性と海運市況	15
5.4 ゼロエミッション船の船価推定	18
5.5 日豪航路のケープサイズバルカーを想定した低速幅広船の経済性評価	20
5.6 まとめ	23
6. 脱炭素燃料を使用する船舶の安全基準	23
6.1 概要	23
6.2 水素を燃料に使用する船舶の安全ガイドライン案の審議状況	24
6.3 アンモニアを燃料に使用する船舶の安全ガイドライン案の審議状況	24
6.4 まとめ	24
7. まとめ	24
謝 辞	25
References	25

1. まえがき

海上技術安全研究所（以下、海技研）のプロジェクトチーム（PT）は、我が国海事産業において特に重要な認識される喫緊の課題に対して機動的に取り組むことを目的として設置され、所内の複数の研究系から、個々のテーマに関連した研究分野の研究者が結集し、連携強化を図ってきた。温室効果ガス（Greenhouse gas, GHG）削減は海事分野に限らず、現在すべてのセクターにおいて全球的な取り組みが加速している最も重要な課題の一つである。GHG削減プロジェクトチームは、2020年に設立された4つのPTのうちの一つであり、1) 流体力学的観点からのGHG削減技術の開発、2) 低・脱炭素燃料並びに機関効率の観点からのGHG削減技術の開発、3) 海上物流の需要予測に基づくGHG総排出量推定ツールの開発、を主な研究課題とした。この3つの研究課題で得られた知見を統合することによって、GHG削減目標を達成するための戦略とビジネスモデルを立案し、外部連携も視野に入れながら、成果の社会実装を目指す計画としてきた。

本報告は、流体力学的観点からのGHG削減技術の開発において、「革新的省エネ技術の開発」の一環として行ってきた低速運航船開発の検討について、低・脱炭素燃料利用と経済的評価に関する検討を加えてまとめたものである。ゼロエミッション船のコンセプト提案に向けた基礎的検討の結果を紹介する。

2. 2050年カーボンニュートラルに向けた取り組み

前述のように全球的な温室効果ガス削減への取り組みはますます加速し、2050年におけるカーボンニュートラル達成を日本も含め多くの先進国が目標に掲げている。

海事分野におけるGHG削減は、国際海運については国連の専門機関である国際海事機関（International Maritime Organization, IMO）によるGHG削減戦略に従う。これは国際海運においては、輸出国や輸入国、船籍国、船主、運航者、船員、荷主、燃料生産国、燃料供給国など、一隻の船舶に関わる関係国が多岐にわたり、国ごとの枠組みになじまないためである。IMOでは2023年7月に開催された第80回海洋環境保護委員会（Marine Environment Protection Committee, MEPC）において、2018年に採択された初期の「GHG削減戦略」の改正が行われた。このGHG削減戦略2023では「2050年頃までにGHG排出ゼロ」を掲げ、実効性のある対策を実現するための具体的な目標などが追加された¹⁾。表2.1にIMOのGHG削減戦略2023の概要を初期戦略と比較して示す（参考文献2）を参考に作成）。2050年頃GHG排出ゼロとする目標の前倒しと、その達成のため、2030年及び2040年におけるGHG排出量の目安が追加された。また、2030年までに国際海運で使用されるエネルギーの5～10%に対してGHG排出ゼロまたはゼロに近い技術、燃料、エネルギー源を導入することとされた。なお、IMOが実施したGHG排出に関する第4次調査報告（4th IMO GHG Study）³⁾によれば、2018年時点における国際海運全体からのCO₂排出量は約9億2000万tで、世界全体のCO₂排出量の約2.5%を占める。

表2.1 IMO初期GHG削減戦略と2023年版の比較（削減率は2008年比）

	IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships		Note
	2018 initial strategy	2023 revised strategy	
GHG排出量 Absolute emission reduction		2030: -20%～-30% 2040: -70%～-80%	目標達成のための目安 Indicative checkpoints
	2050: -50% 今世紀中なるべく早期にネットゼロ	2050頃: net-zero	目標 Levels of ambition
CO ₂ 排出率(g-CO ₂ /ton-mile) Carbon intensity	2030: at least -40% 2050: at least -70%	2030: at least -40%	
ゼロエミッション技術・燃料等の導入 Uptake of zero GHG emission fuel		2030: 5%～10% (総使用エネルギー中の割合)	中長期対策において考慮
公正かつ公平な移行 Just and equitable transition			
政策的手段の検討 Policy measures	短期的、中期的、長期的対策の可能性をリストアップ	2025年までに、技術的・経済的措置を含む中期対策を採択	
対象範囲 Scope	Tank-to-wake CO ₂ 排出 Tank-to-wake carbon emissions	Well-to-wake GHG排出 Well-to-wake GHG emissions	2023年版では、CH ₄ , N ₂ Oなどもカウント

一方、内航海運に関しては、国連気候変動枠組条約（United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC）における国別の排出量に計上されるため（いわゆるパリ協定の枠組み）、各との対策に委ねられている。2021年に閣議決定された、わが国の「地球温暖化対策計画」⁴⁾においては、中期目標として2030年度に2013年度比で46%削減、長期目標には2050年までのカーボンニュートラルを掲げている。このうち、運輸部門における中期目標は2030年度に2013年度比35%削減となっており、内航海運の目標は、図2.1に示すように、2013年度比で約17%削減（CO₂排出量で181万t削減）である⁵⁾。ちなみに2019年度における日本のCO₂排出量11億800万tのうち、運輸部門からの排出量は2億600万t（全体の18.6%）であり、内航海運は、運輸部門の5.0%（日本全体の0.93%）に当たる1,025万tを排出している。また、「第5期国土交通省技術基本計画」⁶⁾や「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」⁷⁾などでは、GHG削減のために、水素・アンモニア(NH₃)・メタノール・バイオ燃料等の代替燃料や電池推進システムの利用によるGHGの排出削減が政策に取り入れられている。

また、図2.2に例を示すように様々な機関が発表しているエネルギー見通しでも、多くの機関が船舶分野における2050年の燃料見通しは、アンモニア、バイオ燃料、グリーン水素から製造されるメタン・メタノールなどのカーボンニュートラルな合成燃料（e-fuel）が中心になるとしている^{8)~11)}。このようにGHG排出削減や排出ゼロの目標達成のためには、代替燃料などの利用が必須であるが、多くの課題が残されている。現時点では多くの代替燃料は化石燃料を由来として製造されたものであっても（ブラウン水素、ブラウンアンモニアなどと呼ぶ）、燃料としてのサプライチェーンは確立していない。再生可能エネルギーで製造された燃料（グリーン水素など）や、二酸化炭素回収・貯留技術（Carbon dioxide Capture and Storage, CCS）を利用して製造された燃料（ブルー水素など）など、カーボンニュートラルな代替燃料の供給量や燃料価格については、不確定要素が多く残されている状況である。図2.3及び図2.4に代替燃料価格の予測例を示す^{11), 12)}。多くの製造プロセスにおいて、コストの大部分を再生可能水素の製造が占めると考えられる。より安価な再生可能エネルギーの入手が必須となるため、地域格差が生じる可能性が指摘されている。また、船舶設計や運航への影響として、これらの代替燃料は既存の化石燃料に比べ、体積当たりのエネルギー密度が低いことから、燃料タンク容積は従来の重油タンクと比べ、2.5～6倍程度の大きさになることが懸念される。

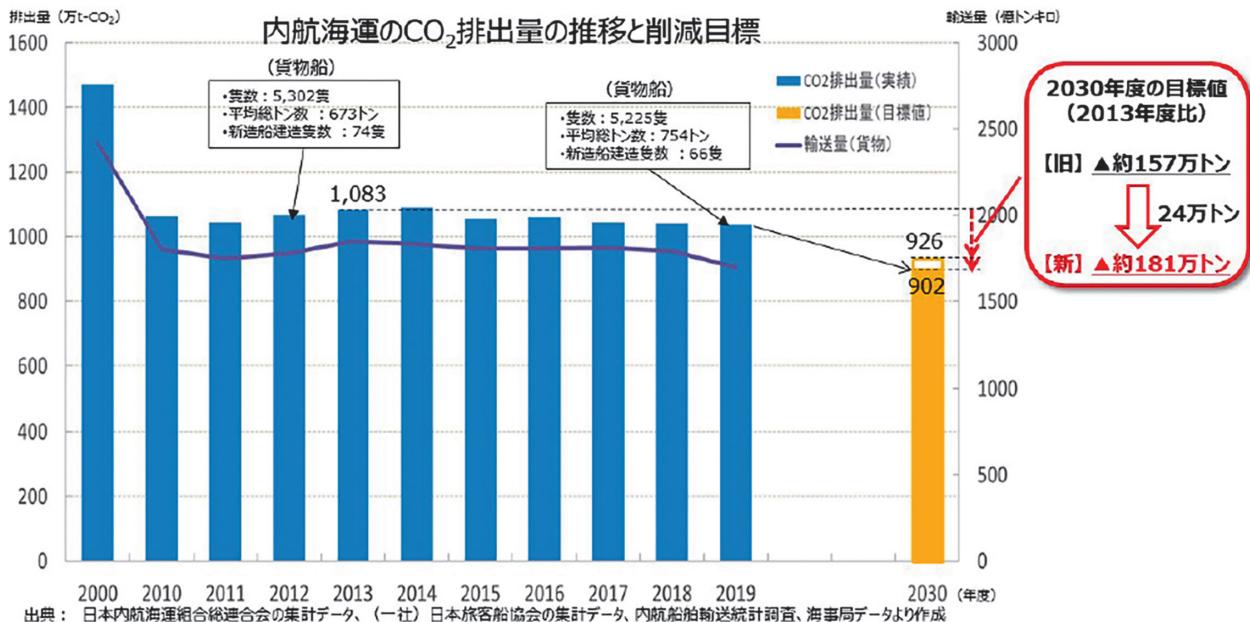
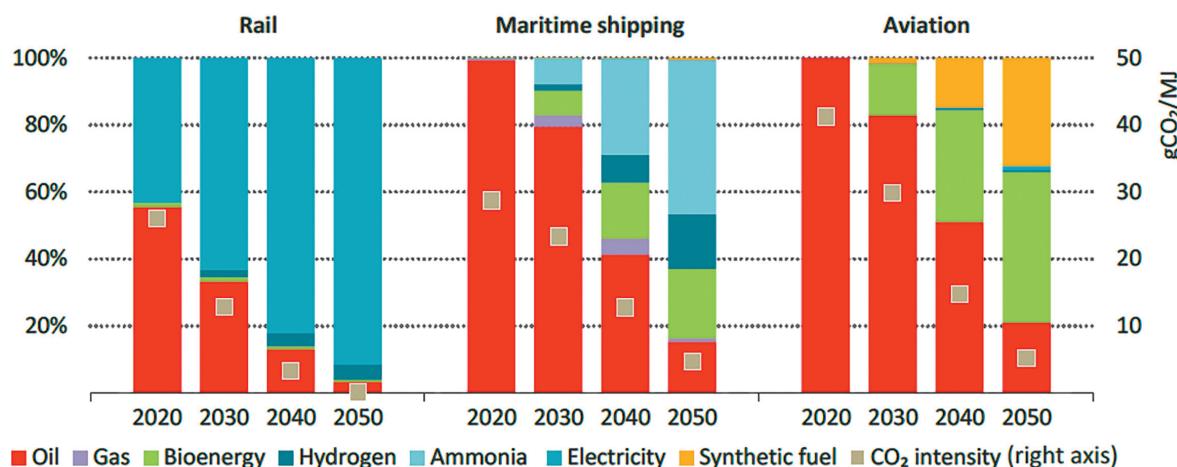
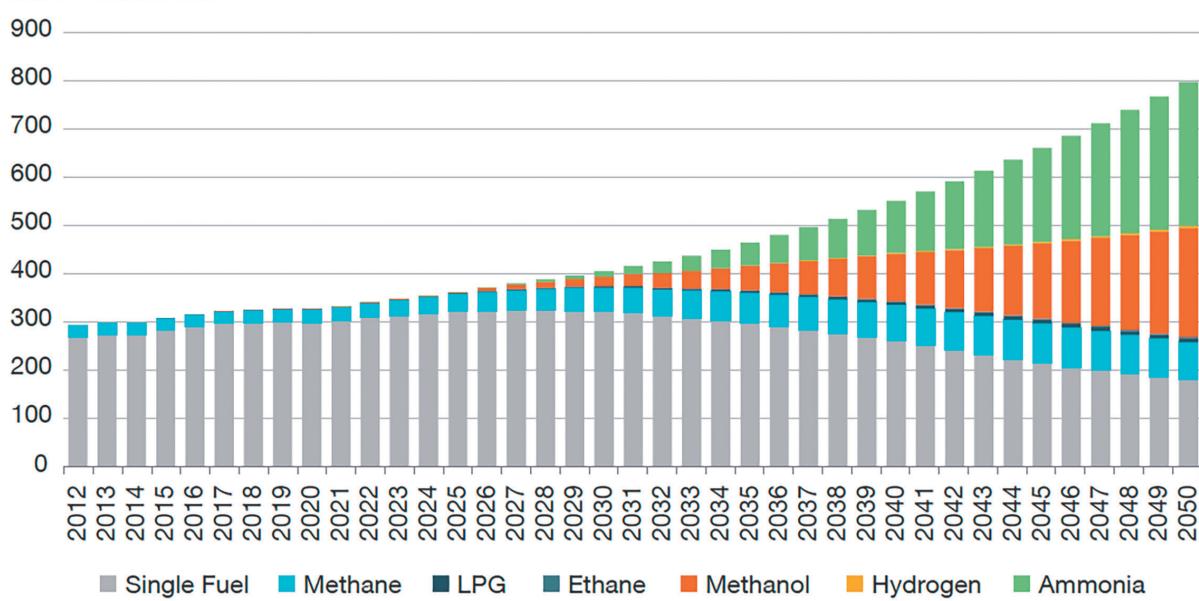
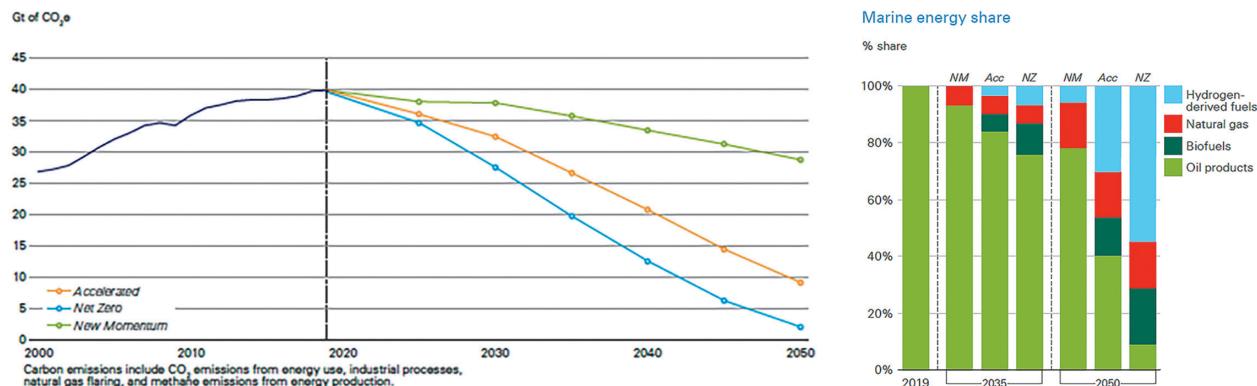


図2.1 内航海運における2030年CO₂削減目標⁵⁾

(a) IEAによる自動車以外の輸送部門での2030, 2040, 2050年燃料構成予測^⑧

Fuel required to meet demand

Million tonnes fuel

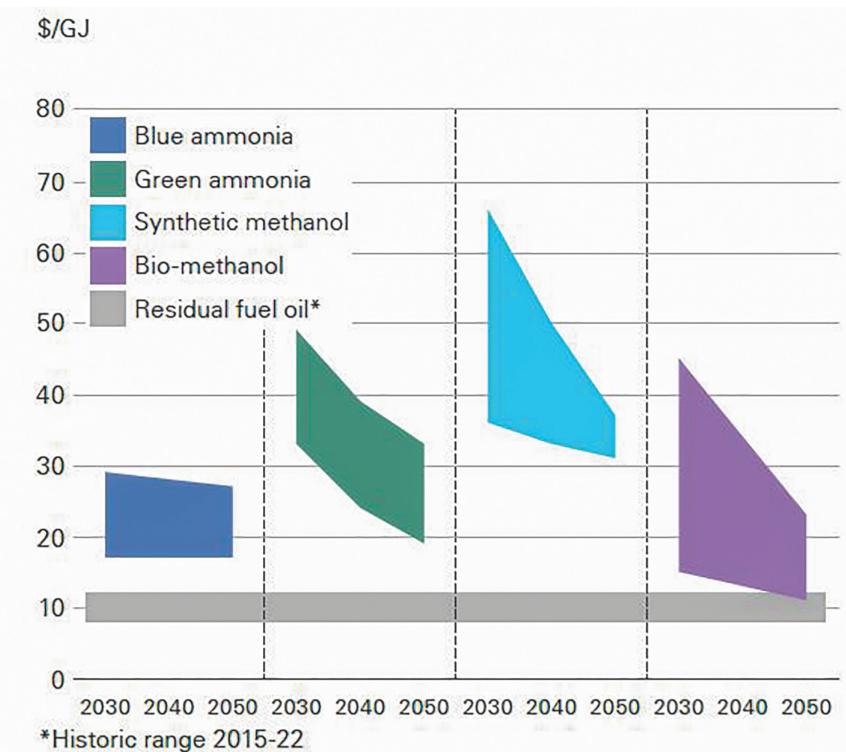
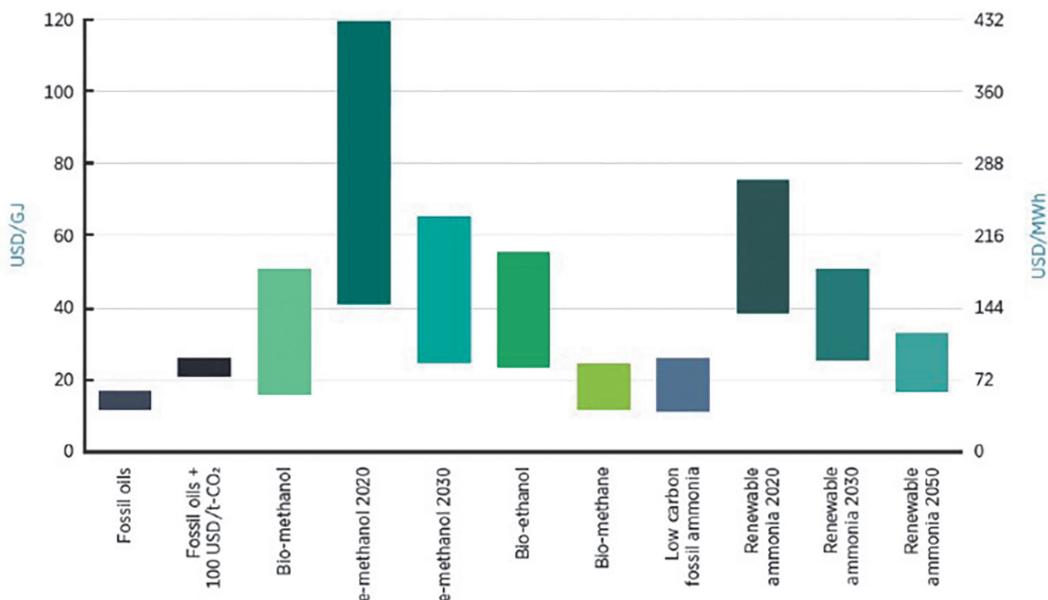
(b) Man Energy Solutionによる2050年に向けた燃料構成予測^⑨(c) BPによる2035年, 2050年燃料構成予測^⑩

左: 2050年に向けたエネルギー転換シナリオ

(New Momentum:NM, Accelerated:Acc, Net Zero:NZの3つのシナリオ)

右: シナリオごとの燃料構成予測

図2.2 各機関によるゼロエミッションに向けた船用燃料の構成予測例

図 2.3 BP による船用将来燃料の単位エネルギーあたりの燃料価格予測¹⁰⁾図 2.4 IRENA による単位エネルギーあたりの燃料価格予測¹²⁾

船舶の寿命は、一般的に 20 ~ 25 年程度であることを考えると、GHG 排出ゼロの目標を達成するためには、2030 年ごろまでにはゼロエミッション船、もしくはゼロエミッションレディ船の市場への投入を開始し、順次隻数を増やしていく必要がある。上記のような燃料価格や燃料タンク容積の問題等を考えると、海上物流市場に受け入れ可能とするためには、単なる燃料転換だけではなく、更なる省エネの追求との組み合わせが重要なポイントであり、多様な低・脱炭素燃料を効率良く安全に利用する技術の早急な開発が望まれている。このため、現状船に対し単位輸送量当たりの燃料消費量（輸送効率）を 2 倍以上向上させ、輸送コストの大幅な増加を抑制可能とした従来の延長線上にない画期的な船型を開発する必要があると考え検討を行ったので、その結果を報告する。

3. 低速幅広コンセプト船の検討

3.1 概要

船舶はこれまでにも船型やプロペラの改良、省エネ装置の採用等により燃費効率の改善を続けてきており、すでにエネルギー効率設計指標（Energy Efficiency Design Index, EEDI）がフェーズ3に対応した船も建造されている。しかし、国際的なGHG排出削減の動きはさらなる省エネ化を要求しており、これに対応するには航海速力の低下や船体の大型化をより一層進めることが有効かつ確実な対応である。また二酸化炭素（CO₂）を排出しない脱炭素燃料を使用することも選択肢の一つであるが、そのような燃料は従来の重油燃料と比べて格段に高価であり、燃料消費量の低減に対する要求はより一層大きなものとなっている。この章では、従来よりも低い計画速力を想定し、輸送効率を従来船と比べて2倍以上向上させる、これまでの船型設計の延長線上にない画期的な船型の検討結果を報告する。

3.2 船型の検討

航海速力を従来よりも下げる場合、同じ期間での航海数が減少するため、総輸送量を維持するためには隻数を増加するか船型を大型化し載貨重量を増やす必要がある。本研究では船体の大型化で対応することを目指した。船体の大型化には船長や船幅、喫水の増加の他に肥大度を増やす選択肢があるが、船長や喫水の増大には航路や港湾設備の制限があるため、ここでは船幅と肥大度をパラメータとして輸送効率に優れた組み合わせを探査した¹³⁾。

船型検討の初期値となる母船型には公開船型である Japan Bulk Carrier¹⁴⁾（以下、JBC 船型）を採用し、船型ブレンディング技術¹⁵⁾を用いて JBC 船型の船幅と船首肥大度、船尾肥大度をそれぞれ変化させた 1,331 (11³) 隻のシリーズ船型を生成した。JBC 船型の計画速力は 14.5 ノットであるが、それに対し本研究で対象とする低速肥大船の速力の目標値は 10 ノットと設定した。生成した全ての船型に対し、レイノルズ平均ナビエストークス方程式による数値流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）プログラム NAGISA¹⁶⁾を用いて抵抗計算と自航計算を行い、推進性能を推定した。計算対象としたシリーズ船型はそれぞれ排水量が異なるため、その影響を除去して推進性能の評価を行うために (3.1) 式に示す輸送効率 C_{eff} を用いた。

ここで、 DHP は伝達馬力 [kW]、 V_s は船速 [knots]、 ∇ は排水容積 [m^3] である。

CFD 計算結果から得られた C_{eff} を船型肥大度を表すパラメータ L/B ($1-C_B$) と方形係数 C_B で整理した図を図 3.1 と図 3.2 に示す。ここで L は船長、 B は船幅を意味する。低速で輸送効率が高い船型の選択に際しては C_{eff} が JBC 船型と同等であり、かつ開発船型に研究的・先駆的要素を持たせるために従来船型にない程度に大きな船幅喫水比 (B/d) となるものとし、図 3.1 と図 3.2 の三角マーク及び表 3.1 に示す要目を有する低速幅広バルクキャリア船型 (Slow and Wide Bulk Carrier 船型、以下、SWBC 船型) として採用した。

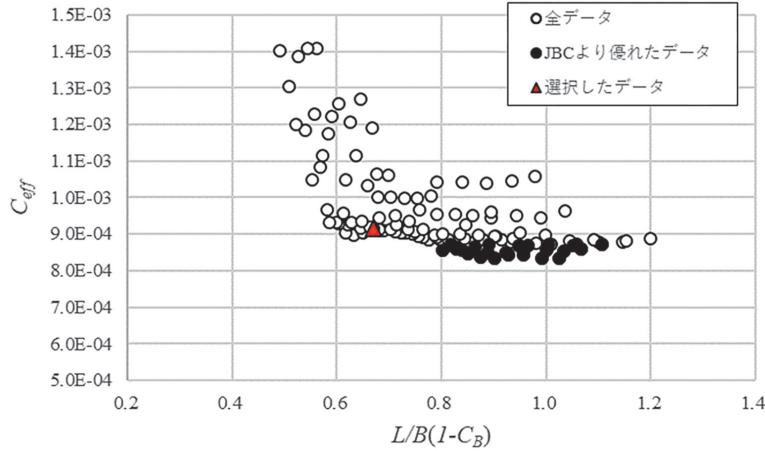


図 3.1 船型肥大度 $L/B(1-C_B)$ と輸送効率 C_{eff} の関係

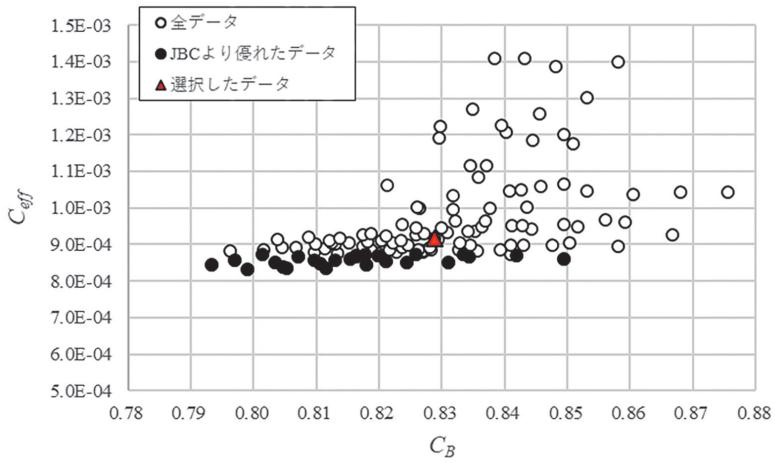


図 3.2 方形係数 C_B と輸送効率 C_{eff} の関係

表 3.1 SWBC 船型と JBC 船型の主要目等

		Model scale		Ship scale	
		SWBC	JBC	SWBC	JBC
全長	L_{OA} [m]	5.173	7.275	291.00	291.00
垂線間長	L_{PP} [m]	5.084	7.000	286.00	280.00
船幅	B [m]	1.3	1.125	73.13	45.00
計画喫水	d [m]	0.293	0.413	16.50	16.50
方形係数	C_B [—]	0.832	0.858	0.832	0.858
載貨重量	DWT [t]	—	—	254,000	158,000
計画速力	V_s [knots]	—	—	10.0	14.5

3.3 推進性能評価

前節で決定した SWBC 船型について、水槽試験により推進性能を評価することとした。使用した試験水槽は海技研の 400m 水槽であり、通常は長さ 7 ~ 8 m 程度の模型船を用いるところ、SWBC 船型は模型船の船幅が水槽のトリミングタンクのサイズの制約にかかったため、全長は約 5.1 m と、やや小さめの模型とせざるを得なかった。模型船の写真を図 3.3 に示す。

水槽試験で得られた造波抵抗係数 C_w および自航要素を図 3.4 と図 3.5 に示す¹⁷⁾. ここで, $1-t$ は推力減少係数, $1-ws$ は実船の有効伴流係数, h_R はプロペラ効率比である. 比較対象の JBC 船型と比べて SWBC 船型の造波抵抗係数は計測を行った全速度域で高い値を示しており, 幅広化の影響が表れていることが分かる. 一方で, 自航要素には大きな違いは見られない. 自航要素も幅広化の影響を受けるものの JBC 船型よりも船尾肥大度が痩せ気味の船型が選択された結果であると考えている.

図 3.6 に船速馬力曲線を示す。馬力計算に用いた有効伴流係数は実船換算された数値を用いている。またここで、排水量ではなく輸送量を指標として考慮するために新たな輸送効率係数 EEC (Energy Efficiency Coefficient) を(3.2)式のように定義する。SWBC 船型と JBC 船型の計画速力はそれぞれ 10 ノットと 14.5 ノットであり、その船速での所要馬力と EEC を表 3.2 に示す。SWBC 船型の EEC は JBC 船型に対し 0.446 倍となり従来船型に対し 2 倍以上の輸送効率向上ができる事を確認した。

ここで、 BHP は軸馬力 [kW], V_s は船速 [knots], DWT は載貨重量 [t] である。

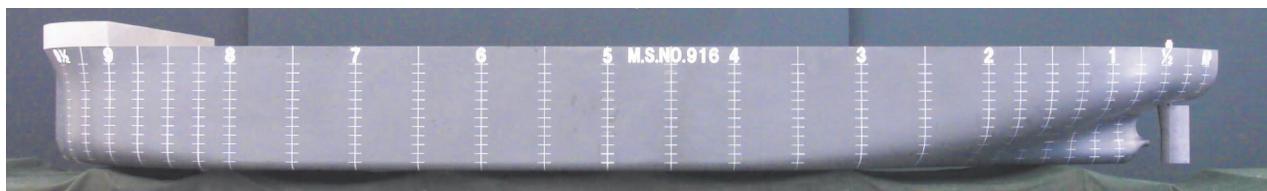


図 3.3 SWBC 船型の模型船

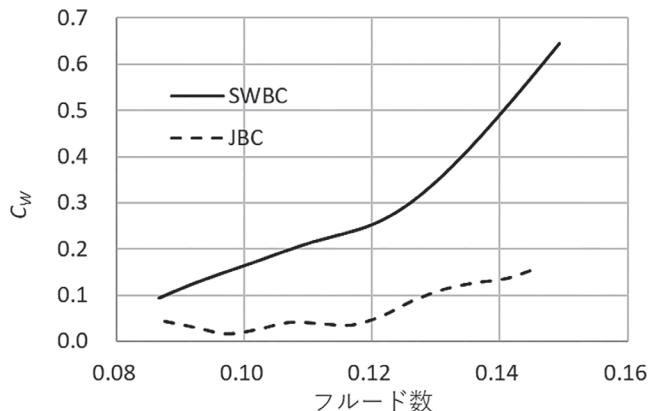


図 3.4 造波抵抗係数

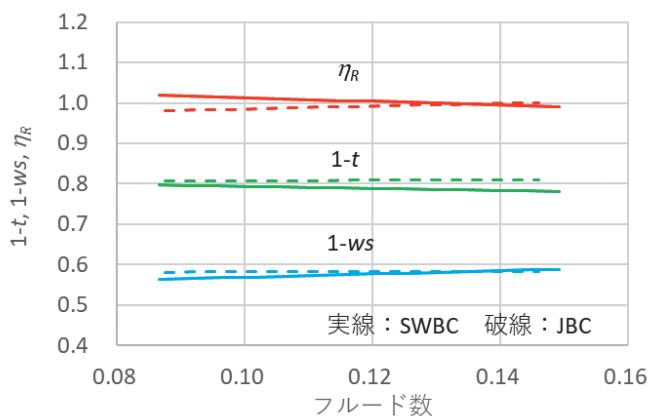


図 3.5 自航要素

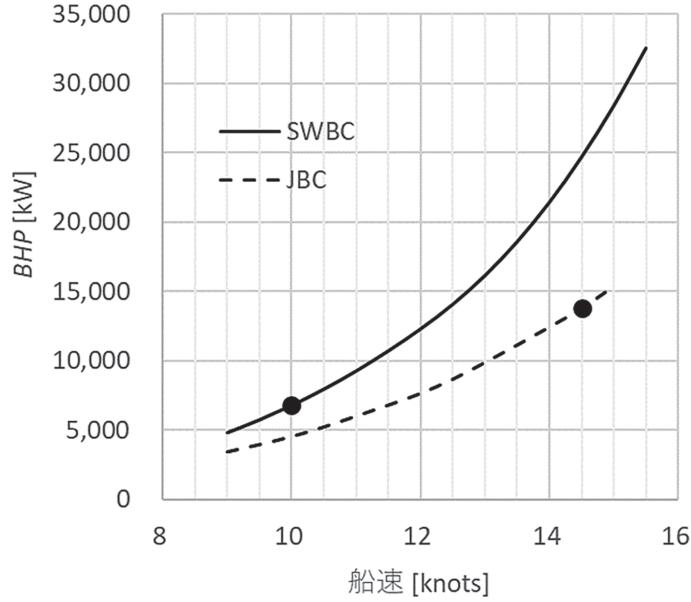


図 3.6 船速馬力曲線

表 3.2 SWBC 船型と JBC 船型の輸送効率係数等

		SWBC	JBC
船速	V_s [knots]	10	14.5
制動馬力	BHP [kW]	6,827	13,811
載貨重量	DWT [t]	254,000	158,000
輸送効率係数	EEC [$\times 10^{-3}$ kW/(t knots)]	2.688	6.028
EEC 比	—	0.446	1

3.4 最低推進出力評価と主機の決定

SWBC 船型は低速化により従来船型よりも 2 倍以上の輸送効率係数が達成でき、主機に求められる必要馬力も格段に低下できた。一方で、荒天下での十分な操船性を確保するために、IMO では船舶が具備すべき最低推進出力をガイドラインで規定しており、SWBC 船型もそれを満足する必要がある。ここでは海技研の実運航性能シミュレータ VESTA¹⁸⁾ の最低推進出力の合否判定機能を用いて、同ガイドラインのレベル 2 の最低推進出力を満足する主機を選定した。最低推進出力ガイドラインは現在もアップデートが行われているが、この検討時点では対象としたガイドラインは IMO 文書 MEPC.1-Circ.850-Rev3 である。VESTA は同ガイドラインが規定する荒天条件（有義波高、風速、要求船速）において、波浪中抵抗増加量や風圧抵抗を計算し要求船速を維持するために主機に求める出力と回転数を推定できる。これにより決定した SWBC 船型に適した主機の連続最大出力は 12,300kW、回転数は 62rpm である。この主機の作動範囲と最低推進出力での作動点を図 3.7 に示す。

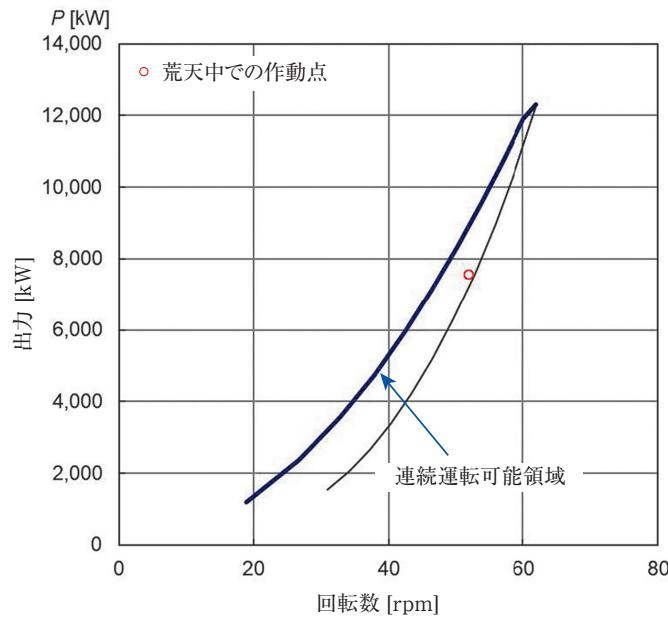


図 3.7 主機特性と最低推進出力の関係

3.5まとめ

ケープサイズバルクキャリアとして設計されたJBC船型を対象に輸送効率係数を大幅に向上させることを目指し、設計速力を従来の14.5ノットから10ノットに低下させ、輸送量を維持するために船型の幅広化を行った。開発した低速幅広船型について水槽試験により推進性能を評価した結果、従来船型よりも輸送効率係数が約55%改善することを確認した。幅広化によって造波抵抗は増加するものの自航要素はほとんど影響を受けない設計とすることができ、低速航行による馬力減少と船型の大型化による載貨重量の増大による効果が顕著に表れた。また、実運航性能シミュレータVESTAを用いた荒天中の船速と馬力の推定により、IMOの最低推進出力ガイドラインのレベル2評価において規制をクリアできることも確認した。

4. 低・脱炭素燃料利用の検討

4.1 概要

2章でも紹介したように、海事分野ではGHG削減のために、低・脱炭素燃料を利用する試みがなされている。従来の重油燃料に代わって液化天然ガス（Liqified Natural Gas, LNG）やメタノールなどの低炭素燃料への転換やカーボンニュートラルであるバイオ燃料、脱炭素燃料である水素、アンモニアの利用に関する試みがある。本章では、これらの低・脱炭素燃料の基本的な性質を示すと共に現状の開発状況について概説する。また、前章で検討しているSWBC船型に対して、脱炭素燃料である水素、アンモニアを対象に燃料タンク容積の推定を行った結果を報告する。

4.2 低・脱炭素燃料利用技術の開発状況と低速幅広船型への利用を検討する燃料

低・脱炭素燃料の性状比較を表4.1に示す。なお、後述する様にバイオ燃料は、低・脱炭素燃料の中では、重油に近い密度や発熱量を持っているが、種類が多く性状もさまざまであるため、表には記していない。いずれの低・脱炭素燃料も、体積あたりの低位発熱量（体積当たりのエネルギー密度）が、C重油に比べて低い。これに起因して燃料タンク容量や運航形態が同一の場合に航続距離が短くなることへの対策が必要である。適切な航続距離と燃料タンク容量、積荷量の検討、さらに船体の最適設計や省エネデバイスなどの省エネ技術の導入、運航方法の変更などの総合的な対策が必要である。

表 4.1 低・脱炭素燃料の性状比較

		C重油*	メタノール	メタン	アンモニア	水素
化学式			CH ₃ OH	CH ₄	NH ₃	H ₂
液体密度 (温度)	kg/m ³ (°C)	972.3 (15)	795.6 (15)	426 (-164)	681 (-33)	71 (-253)
低位発熱量	MJ/kg	40.9	19.9	50.0	18.6	120.0
低位発熱量 (体積当たり)	GJ/m ³	39.8	15.9	21.3	12.7	8.5
体積当たりの 低位発熱量の比率 (C重油に対する)	%	100	40	54	32	21
沸点(大気圧下)	°C	—	65	-164	-33	-253
自己着火温度	°C	—	460	640	651	520
燃焼速度	cm/s	—	56	40	7	312

*海技研で入手実績のある C 重油 (硫黄分 2.15%) の代表性状

これらの燃料の利用技術としては、舶用機関としてデュアルフューエル (Dual Fuel, DF) エンジンやガス専焼エンジンの利用が挙げられる。DF エンジンとは、ディーゼルモードとガスモードの 2 つのモードで運転が可能で、ディーゼルモードでは軽油や重油のみでの運転が、ガスモードでは LNG 等のガス燃料を少量のパイロット燃料 (軽油や重油) で着火・燃焼させることができるエンジンである。

LNG を利用する DF エンジンやガス専焼エンジンについては、すでに商用エンジンが開発され、多くのエンジンメーカーから、LNG を利用するエンジンが提供されている。

メタノールについても、2016 年には、低速 2 ストローク DF エンジンを搭載した船が就航している¹⁹⁾。また、阪神内燃機工業株式会社は、内航タンカー用の低速 4 ストロークのメタノールエンジンを完成している²⁰⁾。この他、WinGD によるメタノール燃料の低速 2 ストローク DF エンジンの実船への供給予定²¹⁾、ヤンマー・パワーテクノロジー株式会社による 4 ストロークの実機開発が進んでいる²²⁾。

バイオ燃料は、バイオマスからつくる燃料の総称であり、ペレットなどの固体燃料、バイオエタノールやバイオディーゼルなどの液体燃料、そして気体燃料と様々な種類がある。舶用燃料油としては、廃食油、油脂をメチルエステル化した脂肪酸メチルエster (Fatty Acid Methyl Ester, FAME)，粗バイオ燃料 (Straight Vegetable Oil)，水素化処理した水素化植物油 (Hydrotreated Vegetable Oil, HVO) 等の利用が検討されている。これらの燃料は、燃料としての性状が従来の軽油や重油に似ており、長時間保管した場合の燃料性状の変化、パッキンの膨潤や腐食などへの対策の必要があるものの、既存の燃料供給設備での使用が可能である。現在は、様々なバイオ燃料の実証実験が行われている。一例であるが、国土交通省が船舶における「更なる省エネの追及」を柱の一つとして、既存船にバイオ燃料の活用を推進するため、「船舶におけるバイオ燃料取り扱いガイドライン策定検討会」において、「船舶におけるバイオ燃料取り扱いガイドライン」²³⁾ が策定された。本ガイドラインでは、内航の自動車運搬船で、FAME と LS (Low Sulfur, LS) C 重油の混合油 (バイオ燃料を 10% 混合した燃料 B10 および 24% 混合した燃料 B24) を用いた約 1 か月間の実船試験や陸上試験を実施し、大きな問題がなかったことが報告されている。また、3 隻の内航船において清浄化処理をした SVO と LSC 重油の混合油 (B10 および B24) による実証試験を実施し、問題は確認されなかつたことを報告している。

水素は、以前から燃料利用のための研究開発が実施されており、内燃機関以外にも燃料電池による利用もできる。内燃機関の分野では 1970 年代には、乗用車を含む自動車への開発が行われた。自動車と比較して大型のエンジンにおける水素燃料利用としては、グリーンイノベーション基金事業の「次世代船舶の開発」の「水素燃料船の開発」において水素焚き船舶に搭載する中・高速 4 ストロークエンジンと低速 2 ストロークエ

ンジンの開発が進められており、2026年度までに船舶搭載前の陸上試験完了を目指している²⁴⁾。水素を燃料とするエンジンの船舶搭載例としては、日本国内においてツネイシクラフト＆ファシリティーズ社は、2021年7月に水素軽油混焼エンジンを搭載した旅客船「ハイドロびんご（HYDRO BINGO）」（総トン数：19トン、エンジン：ボルボ・ペンタ製 HyPenta D13（441 kW）×2基2軸）を就航した²⁵⁾。また、海外ではCMB.TECH社とABC社の合弁企業であるBeH2ydro社は、水素DFエンジンおよび火花点火式水素専焼機関の開発を進めており、水素DFエンジン（2000 kW × 2基2軸、水素混焼率75%）を搭載したタグボートが2023年に稼働している²⁶⁾。

アンモニアは、1960年代より脱炭素燃料として利用する試みがあり、2008年頃から、GHG削減を目的とした研究開発の報告がある。アンモニアは、表4.1に示されるように、メタンやメタノールに比べて燃焼速度が遅く低・脱炭素燃料の中でも未燃のまま排出され易い。さらに、アンモニアの燃焼過程では、温室効果をもつ一酸化二窒素（N₂O）が生成される。これまで、アンモニアの燃焼速度の遅さを改善する方法や、一酸化二窒素の排出低減に資する研究の報告がある。詳細は、解説記事²⁷⁾をご参照頂きたい。最近のアンモニア燃焼の開発としては、株式会社IHIがガスタービンにおいて、アンモニアのみでN₂Oの排出を低減した運転に成功したことを報告している²⁸⁾。舶用機関への利用としては、海外ではMAN²⁹⁾、Wärtsilä³⁰⁾、WinGD³¹⁾が、国内では株式会社ジャパンエンジンコーポレーション³²⁾、株式会社IHI原動機がアンモニアを利用するDF機関の開発を発表している³³⁾。舶用機関での利用を想定したアンモニアの基礎燃焼の解析や燃焼方法の研究開発については、軽油などの炭化水素燃料の燃焼によって、液体アンモニア噴霧を着火燃焼させる研究や、空気-アンモニア予混合機内へ軽油を噴射して着火燃焼させる方式の研究が実施されている^{34), 35)}。

以上のように、各種の低・脱炭素燃料の利用のための技術開発が進んでいる。水素やアンモニアは、カーボンフリー燃料であり、その燃焼時には二酸化炭素（CO₂）を排出しないため、燃料の転換によって脱炭素が可能である。さらに水素やアンモニアを利用する舶用機関の開発や実船搭載も実施されており、将来的に脱炭素燃料として使用できる可能性が高い。また、水素やアンモニアは、燃料としての性状が従来の軽油や重油と大きくことなるため、既存燃料タンクからの変更が必要である。そこで、脱炭素が可能であるが、既存の燃料と性状の大きく違う水素やアンモニアについて、SWBC船型に利用する燃料として検討することとした。

4.3 燃料タンク容積の推計

SWBC船型の比較対象船型はケープサイズバルクキャリア（以下、ケープサイズBC）のJBC船型である。SWBC船型は従来船型と置き換わることを想定しているため、想定航路や航続距離についてもケープサイズBCを参考に決定した。ケープサイズBCの主要な貨物は石炭や鉄鉱石であるため、本研究では積載貨物を鉄鉱石と仮定し、航路は日本-豪州間を想定した。また従来のケープサイズBCの航続距離は24,000 NM(Nautical Mile, 海里又はマイル)程度の船型が多く、ここでもそれに倣うこととした。なお、24,000 NMは日豪航路の約2往復分に相当する。鉄鉱石積載の場合は貨物の比重が大きいため、満載喫水は夏期満載喫水となり、所要馬力計算には夏期満載喫水の馬力曲線を使用した。

燃料の種類は脱炭素燃料としてアンモニア専焼と水素専焼を想定したが、比較対象としてC重油焚きも設定した。C重油(HFO)の単位体積当たりの熱量は39.8 GJ/m³であるのに対し、液化水素(LH₂)は8.5 GJ/m³、液化アンモニア(LNH₃)は12.7 GJ/m³と脱炭素燃料はエネルギー密度が低く、C重油と同じ熱量に相当する燃料を搭載する場合は、燃料単体で液化水素は4.7倍、液化アンモニアは3.1倍の容積となる。そこでC重油焚きのケープサイズBCの航続距離は24,000 NMであるが、液化水素及び液化アンモニアを燃料として想定する場合には航続距離を10,400 NM(日豪航路1往復)とした。大量の脱炭素燃料を長期間積載し続けることはボイルオフガスの発生によるロスも大きくなるため燃料タンク容積は必要最小限としつつ、少なくとも想定航路1往復は燃料無補給で運航できることを想定したものである。表4.2にSWBC船型の燃料タンク容積の推定結果を示す。この推定では、タンクを円筒型の圧力容器(Type-C型独立タンク)と仮定しタンクの内外容積比はこれまでの知見¹³⁾により0.77とした。

表 4.2 燃料タンク容積等 (SWBC 船型)

		HFO	LH ₂	LNH ₃
航海速力	[knot]		10.0	
燃料消費量 (主機+補機)	[t/day]	32	11	71
航続距離	[NM]	24,000	10,400	10,400
燃料必要量	[t]	3,234	478	3,081
充填制限値	[—]	0.96	0.95	0.95
燃料タンク内容積	[m ³]	3,465	7,101	4,756
燃料タンク外容積	[m ³]	3,535	9,274	6,211
燃料タンク外容積比 (C 重油を基準)	[—]	1.00	2.62	1.76

4.4 燃料タンク配置の検討

液体水素や液体アンモニアを燃料とする場合、燃料タンクは一定の大きさを有する圧力容器となることから重油タンクのように船殻間に配置することは困難で、船倉容積を犠牲にしないためにも甲板上に配置することになる。ケープサイズ BC の一般的な船幅は 45m であるが SWBC 船型は載貨重量を増加させるために船幅が 73.13m となっており、甲板上面積は比較的余裕がある。ここでは 4.3 節で推定した外容積の燃料タンクを甲板上に配置し、その実現可能性を検討したので報告する。図 4.1 に液化アンモニア燃料タンクの配置イメージ図を示す。燃料タンクは推定された外容積と船体の大きさを比較するために円筒型で簡易的に表したものであり、厳密に設計されたものではないものの、甲板上に自由度をもって配置可能であることを確認した。

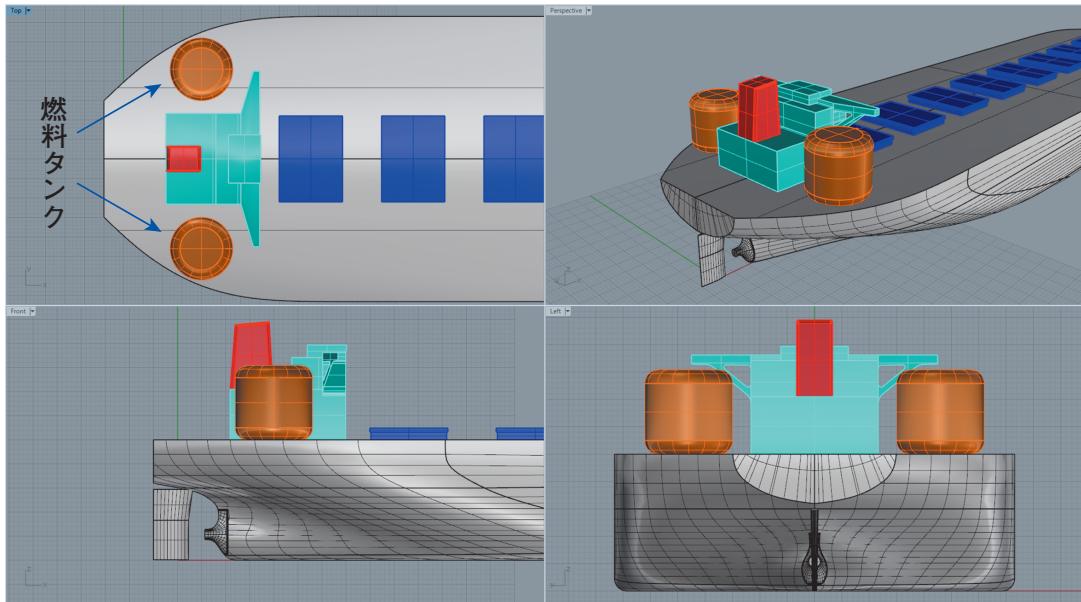


図 4.1 液化アンモニア燃料タンク配置イメージ図

4.5 まとめ

低・脱炭素燃料とそれらを利用する船用機関の現在の開発状況および SWBC 船型の燃料タンクについて概説した。低・脱炭素燃料の中でも、バイオ燃料は、重油に混合する形で既に実船での試験が実施されている。また、水素やアンモニアを利用する船用機関の開発や実船搭載も実施されており、将来的に脱炭素燃料として使用できる可能性が高いことが分かった。これを基に、SWBC 船型を対象に想定航路 1 往復を燃料無補給で運航できる燃料タンクの容積を推定し、船尾甲板上へ自由度をもって配置できることを確認した。

5. 低速幅広船の経済性評価

5.1 概要

Kawakita ら¹³⁾は、ケープサイズバルクキャリア（以下、ケープサイズBC）を対象に、従来よりも低い計画速力を想定し、輸送効率が従来船の2倍以上となる、低速幅広バルクキャリア船型（Slow and Wide Bulk Carrier船型、以下、SWBC船型）の提案を行った。この際、Kawakita ら¹³⁾は、SWBC船型の経済性評価が今後の課題であるとしている。本研究は、Kawakita ら¹³⁾の結果に対して、3.4節に示したように最低推進出力の評価レベルを上げ、波浪外力の推定をより信頼度の高い方法で実施し推進出力等の再検討を行った新たな結果に基づきSWBC船型の経済性評価を行う。SWBC船型の経済性評価は、実際のケープサイズBCの運航実態、市況、船価に基づく。また、近年の低・脱炭素燃料の研究動向に基づき、SWBC船型のゼロエミッション化に関する経済性評価を行う。

5.2 既存研究の内容と本研究の位置付け

近年、国際海運におけるゼロエミッション船の経済性評価に関するいくつかの報告が行われている。将来の国際海運における海上荷動き量、それに必要な船腹量等のシナリオに基づき、船舶からのGHG排出量が予測され、GHG排出量を削減するための手段として、船舶の輸送効率改善やゼロエミッション船の導入等が検討されている。その際、ゼロエミッション船の経済的な導入可能性について、現在は普及していない低・脱炭素燃料の将来における価格、ゼロエミッション船の船価等を想定することにより、将来のゼロエミッション船のコスト構造を推計し、従来船のコスト構造との比較が行われている。本研究と関連性が強いバルクキャリアの分析では、DNV³⁶⁾とMMMC³⁷⁾が具体的な船型等を想定し、ゼロエミッション船の経済性評価を行っている。DNV³⁶⁾は、豪州・中国航路を運航する210,000載貨重量トン数（Deadweight Tonnage、以下、DWT）のニューキャッスルマックスバルクキャリアを想定し、MMMC³⁷⁾は、航路は特定していないが、パナマックスバルクキャリア（70,000-99,000DWT）を想定した分析を行っている。これらの分析では、船舶の輸送効率改善が考慮されているが、本研究の低速幅広船のような大きな運航形態の変更を伴う効率改善は想定されていない。例えば、SWBCにおける船速の低下は、従来船の運航と比較して年間の運航回数が減少することが考えられる。本研究では、日豪航路を運航するケープサイズBCの鉄鉱石運航の実態を踏まえて、経済性評価を行う。

5.3 対象とするケープサイズバルクキャリアの運航特性と海運市況

5.3.1 日豪航路におけるケープサイズバルクキャリアの運航特性

VENSON社のOceanboltデータベースを利用して、日豪航路におけるケープサイズBCの運航を解析した。Oceanboltデータベースは、AISに基づきBCの運航ルートや積載貨物量の推計が行われている。2022年の1年間のデータから、1回でも日豪航路を運航したケープサイズBCは、合計225隻である。この際の積載貨物は、鉄鉱石：121隻、石炭：65隻、鉄鉱石・石炭：38隻、不明：1隻である。図5.1は、ケープサイズBCのDWTの分布を示しており、67隻が存在する210,000DWT程度の船型が最も多い。次いで、43隻の185,000DWT程度の船型が多い。本研究が想定する低速幅広船の254,000DWTは、近年の日豪航路において主要な船型ではないことがわかる。

図5.2は、鉄鉱石の輸送を行ったケープサイズBCの159隻を対象にして、2022年1年間で輸送した鉄鉱石輸送量の分布を示している。200,000～250,000tonを輸送した船舶が89隻を占める。データでは、満載での運航が多数を占めるため、日豪航路に1回程度の運航を行ったケープサイズBCが多い。日豪航路に専従しているケープサイズBCは少ないが、当該航路に1年間専従した船舶として、AWOBASAN MARU（青葉山丸、224,911DWT）が該当した。図5.3は、AWOBASAN MARUの運航ルートを示している。豪州では、Port Walcott港とDampier港で鉄鉱石を積み込んだことが確認できた。また、日本では、鉄鉱石卸しが7港湾で行われ、日本への寄港時に2港湾で鉄鉱石卸しが行われている場合が多かった。図5.4は、1年間のAWOBASAN MARUの船速の変化を示している。図中の各点は、AISから得られた船速を1日単位で平均し、その値が0である場合とその前後1日を除いて示している。船速が0の場合は停泊中と考えられ、そ

れを除いた船速の中央値は 10.1 ノットである。また、日豪航路での 8 往復の運航が確認できる。本研究は、AWOBASAN MARU の運航を参考にして、後述の経済性評価を行う。

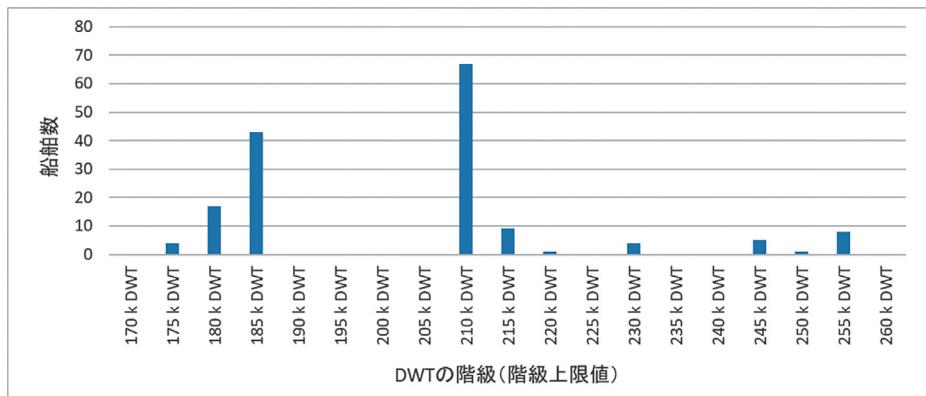


図 5.1 日豪航路を運航するケープサイズ BC の載貨重量分布

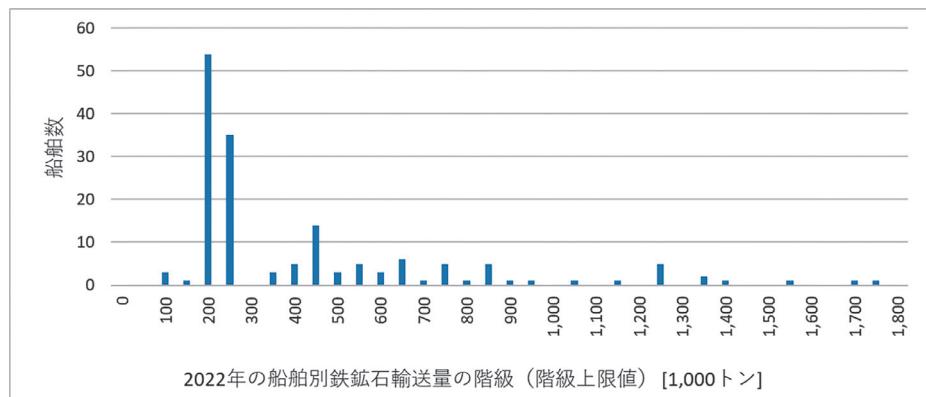


図 5.2 日豪航路を運航するケープサイズ BC の鉄鉱石輸送量分布



図 5.3 2022 年の AWOBASAN MARU の運航ルート

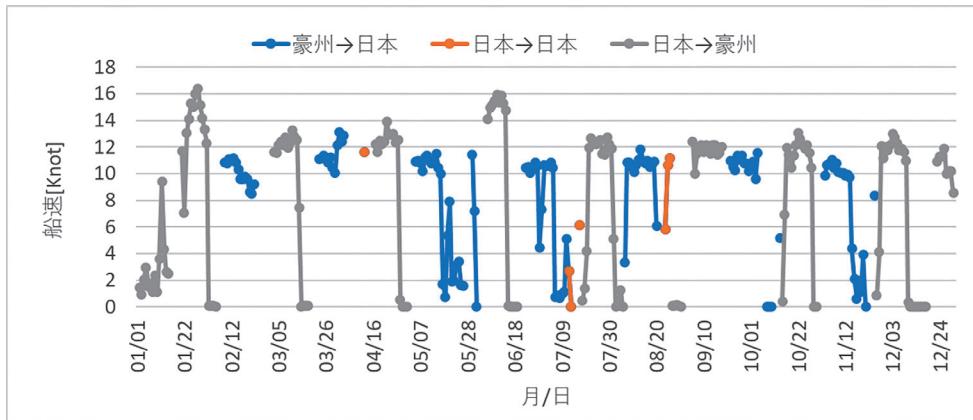


図 5.4 2022 年の AWOBASAN MARU の船速変化

5.3.2 ケープサイズバルクキャリアの海運市況

ケープサイズ BC の海運市況を概観するため、Clarksons Research 社の Shipping Intelligence Network のデータを利用し、ケープサイズ BC に関する運賃 (Voyage Rate), 新造時船価 (Newbuilding Price, 以下, NBP), 運用コスト (Operating Cost, 以下, OPEX), 重油燃料価格 (Bunker Price) の指標に関して、2000 年から 2022 年までの推移を図 5.5, 図 5.6, 図 5.7, 図 5.8 に示す。データは、Clarksons Research 社がベンチマーク船等から収集している値である。運賃は Dampier – Oita のケープサイズ BC (172,000DWT), NBP はケープサイズ BC (176,000 ~ 180,000DWT), OPEX はケープサイズ BC, 重油燃料価格はシンガポールにおける高硫黄燃料油 (High Sulfur Fuel Oil, 以下, HSFO) (3.5% Sulphur) と超低硫黄燃料油 (Very Low Sulfur Fuel Oil, 以下, VLSFO) (0.5% Sulphur) を対象にしたデータを使用している。価格関連の指標は、市況を反映して変動が大きい。本研究の経済性評価では、基本的に 2022 年の価格関連の値を使用する。

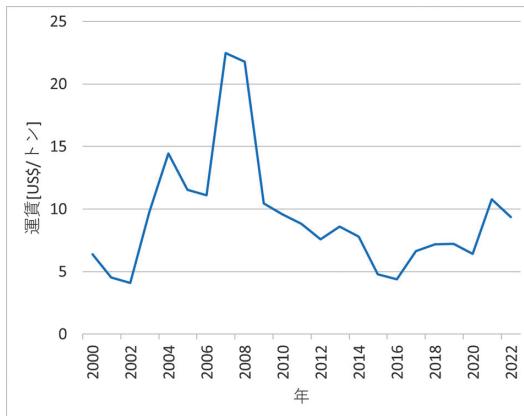


図 5.5 ケープサイズ BC の運賃の推移

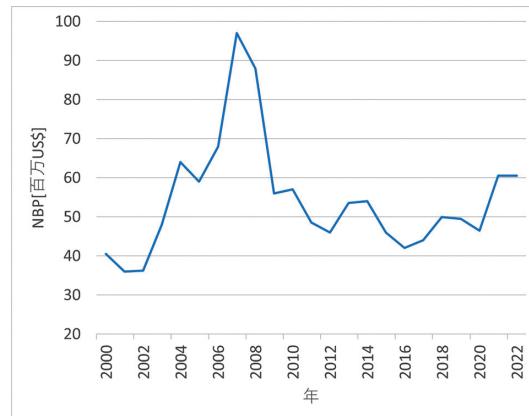


図 5.6 ケープサイズ BC の船価の推移

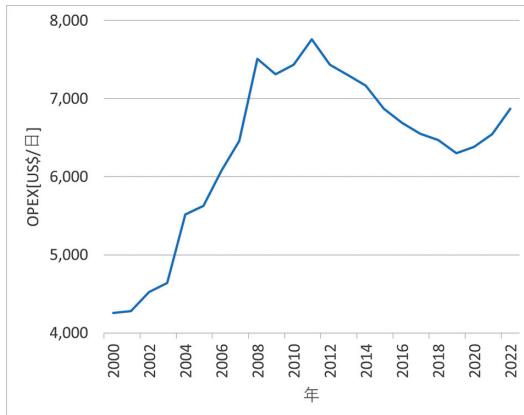


図 5.7 ケープサイズ BC の OPEX の推移

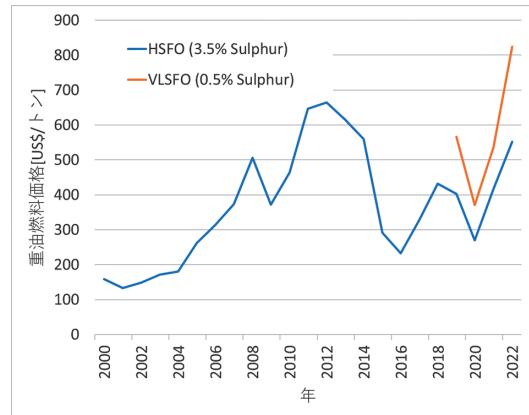


図 5.8 重油燃料価格の推移

5.4 ゼロエミッション船の船価推定

ゼロエミッション船の NBP は、同じ船種の C 重油等を使う従来船の NBP と燃料転換に要する追加コスト、という 2 つの要素に分けて評価した。前者は統計データから回帰分析によりモデル化した。後者は文献調査により推定した。

従来燃料のバルクキャリアの NBP について、DWT に対する標本のプロットを図 5.9 に、主機出力 M_e に対する標本のプロットを図 5.10 にそれぞれ示す。これらは、Clarksons Research 社の船舶の諸元に関するオンラインデータベース World Fleet Register (以下、WFR) から抽出したものである。また、市況などの影響を踏まえて、プロットされている NBP は Clarkson Newbuilding Price Index という指標を使って補正した数値とした³⁸⁾。

この時 WFR の主機に関するデータ項目である Eco-Electric Engine (電子制御主機) を参考に、図 5.9 と図 5.10において 2011 年以前に新造契約を行った分と 2012 年以降に新造契約を行った分は分けてプロットした。これは 2012 年以降に新造契約を結んだ多くの船は、このデータ項目において Eco-Electric Modern とラベリングされていることを踏まえている。この理由について Clarksons Research 社に問い合わせたところ、主機の燃費と NOx 排出量が 2011 年以前の新造契約分のそれより低減しているためと回答した。検証のため、2011 年以前新造契約分と 2012 年以降新造契約分、それぞれの主機の燃料消費率を比較したところ、 M_e が同じであれば前者より後者の方が低くなっていること、燃料消費率の範囲は前者が 170 ~ 177g/kWh であったのに対して後者は 165 ~ 171g/kWh であったこと、をそれぞれ確認した。燃料消費率が低くなれば当然 GHG 排出量および NOx 排出量についても、同じ M_e であれば前者よりも後者の方が低くなることが推測される。

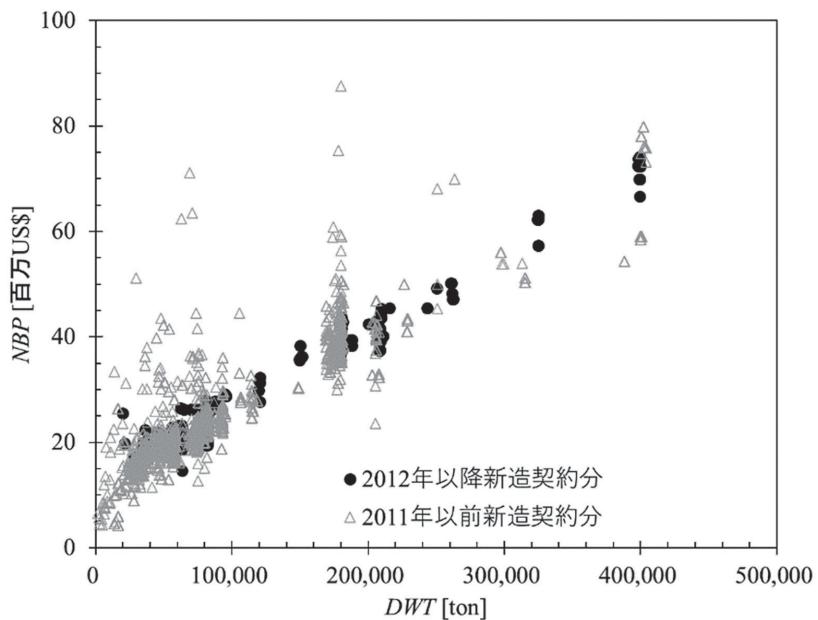


図 5.9 DWT と船価の関係

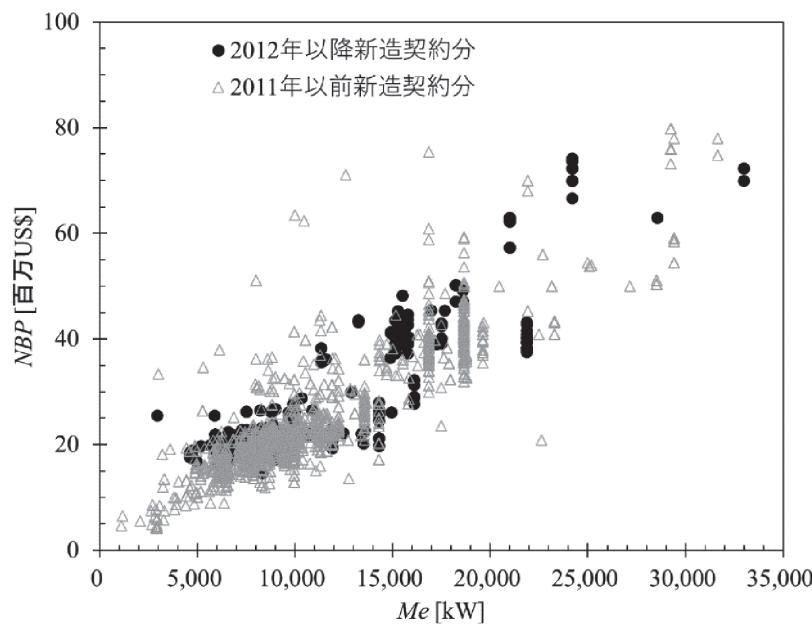


図 5.10 主機出力 M_e と船価の関係

図より NBP は DWT と Me の双方と比例関係にあり、さらに前述の新造契約年の影響も存在することも確認した。これらの結果を踏まえ、NBP に関する重回帰式を以下で定義した。

ここで、説明変数(独立変数)Ecoは、新造契約が2011年以前であれば0、2012年以降であれば1をとるダミー変数(定性的データを回帰分析に使う場合に使用される変数)である。また、 a_0, a_1, a_2, a_3 は偏回帰係数(重回帰式における各説明変数に対する傾き)である。表5.1はこれら偏回帰係数の推計結果である。係数値は(5.1)式に関する重回帰分析の結果、評価した数値である。t値は(5.1)式の各説明変数(DWT, Me, Eco)が目的変数(従属変数のこと。この場合はNBPを指す)への影響の大きさを示しており、基本的にこの数値が2以上であれば影響ありと評価される。以上の分析結果から(5.1)式の決定係数 R^2 は0.87となり、NBPを十分な精度で予測できると判断した。

表 5.1 NBP に関する重回帰式の偏回帰係数推計結果

偏回帰係数	a_0	a_1	a_2	a_3
係数値	1.59×10^7	2.00×10^2	5.98×10^2	1.18×10^6
t 値	32.5	39.1	7.7	3.3

脱炭素燃料は水素またはアンモニア、主機は内燃機関とした事例の初期コストに関する文献を調査した。初期コストには、燃料タンク、燃料供給系、いずれかの燃料に対応した舶用エンジン、バンカリング設備、等の製造や設置に関するコストが含まれている。調査の結果、主機出力当たりの追加初期コスト F [US\$/kW] は、水素を燃料とする内燃機関^{39), 40), 41)} では下限値 667 から上限値 1,891、アンモニアを燃料とする内燃機関^{42), 43), 44)} では下限値 71 から上限値 1,027 に分布していた。そこで、ゼロミッショングループである NBP $_{\alpha_1}$ の推定には表 5.2 で示すようにそれぞれの中間値を使用した。

表 5.2 燃料転換に要する主機出力当たりの追加初期コスト F

ゼロエミッション船 の主機燃料	主機出力当たりの追加初期コスト F (US\$/kW)
水素	1,296
アンモニア	878

以上の結果より、 NB_{Pal} は以下の式で推定した。

$$NBP_{al} = NBP + F \times Me \quad \dots \dots \dots \quad (5.2)$$

NBP の推定結果は表 5.3 にまとめた。項目 “Clarkson によるベンチマーク船” に記しているのは、Clarksons Research 社がベンチマーク⁴⁵⁾としている船型の諸元であり、これの NBP は重回帰式を使用した値である。そして同じく (5.1) 式から推定した重油を燃料とする SWBC 船型の NBP が 75.2 百万 US\$ であることを基準とすると、水素に転換した場合の NBP_{al} は 14% 増の 86.0 百万 US\$、アンモニアに転換した場合の NBP_{al} は 12% 増の 84.1 百万 US\$ となった。以上の NBP_{al} に関する結果を使用して、後述の経済性評価を行う。

表 5.3 対象ケープサイズ BC の船価推定結果

項目	Clarkson による ベンチマーク船	低速幅広船： SWBC	低速幅広船 (水素)： SWBC-H	低速幅広船 (アンモニア)： SWBC-A
DWT [ton]	180,000	254,000	228,124	244,641
Me [kW]	15,586	12,300	12,300	12,300
NBP (NBP_{al}) [百万 US\$]	60.5	75.2	86.0	84.1
NBP (NBP_{al}) [SWBC 対比]	0.80	1.00	1.14	1.12

5.5 日豪航路のケープサイズバルカーを想定した低速幅広船の経済性評価

5.5.1 経済性評価の条件設定

Clarksons Research 社のベンチマーク船における Dampier 港と日本の運航形態を参考に、表 5.4 に示す経済性評価のための設定を行った。脱炭素燃料を使用する SWBC は、重油を使用する船型よりも相対的に大きな燃料タンクが必要となるが、4.4 節で示したように広い甲板面積を利用し燃料タンクを甲板上に設置できることから DWT に対する影響はほとんどない。貨物サイズは、船舶が積載する貨物の重量であり、Clarksons Research 社に従い DWT の 98% としている。SWBC 船型の船速は 10 ノットであり、年間運航回数は運航実績の分析から 8 回とした。

表 5.4 対象船舶の運航内容の設定

運航設定値	Clarksonによる ベンチマーク船	SWBC	SWBC 【水素燃料】	SWBC 【アンモニア燃料】
載貨重量	18.0万トン	25.4万トン	22.8万トン	24.5万トン
貨物サイズ	17.6万トン	24.8万トン	22.3万トン	24.1万トン
積地		Dampier		
揚地		日本		
航海距離	Laden Ballast		3,470 miles 3,470 miles	
航海速度	Laden Ballast	12.0 knot 13.0 knot		10.0 knot 10.0 knot
海上時間		23.2日		28.9日
停泊時間		4.8日		4.8日
シーマージン		1.2日		1.2日
ターン時間		0.8日		0.8日
運航時間合計		29.9日		36.0日
年間運航回数		12.2回		8回
燃料消費	航海時 Laden Ballast	43.0 ton/日 43.0 ton/日 4.5 ton/日 (HSFO)		25.2 ton/日 18.7 ton/日 4.4 ton/日 (HSFO換算)
停泊時				

将来の低・脱炭素燃料価格は、2章でも示したように、大きな不確実性を伴う。本研究は、低・脱炭素燃料価格の仮定と算定が明示された文献である Solakivi ら⁴⁶⁾による低・脱炭素燃料価格を使用した。図 5.11 は、Solakivi ら⁴⁶⁾から引用した、重油燃料価格、水素燃料価格、アンモニア燃料価格の実績値と予測値を示している。

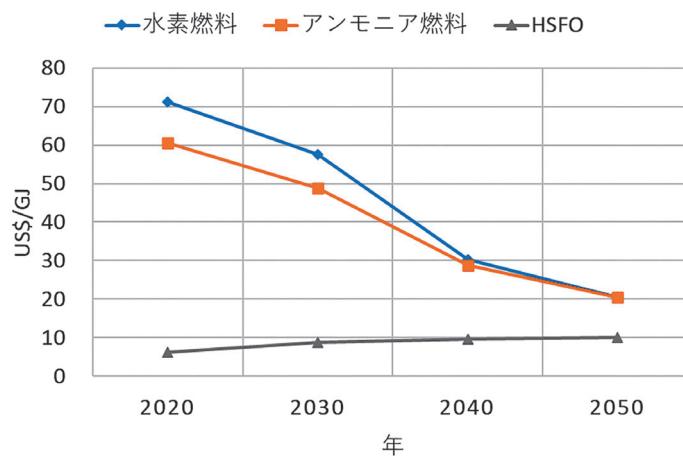


図 5.11 燃料価格の設定

5.5.2 経済性評価の結果

経済性評価の条件に従い、各ケープサイズ BC の 1 年間の運航に関する運賃収入と費用、その差である利益の算出を行った。ゼロエミッション船に関しては、仮に Clarkson によるベンチマーク船が脱炭素燃料を使用した場合も追加している。また、船価に関しては、10 年定額での償却として年間の初期コストを算出している。2030 年、2040 年、2050 年における対象ケープサイズ BC の利益と収支構成を図 5.12、図 5.13、図 5.14 に示す。また、図 5.15 に各ケープサイズ BC に関する利益の推移を示す。SWBC は、Clarkson によるベンチマー

ク船に比べて船速の低下による運航回数の減少が想定されるが、収支に大きな変化は無い。ただし、SWBC 船型の燃料費は少ない。脱炭素燃料の場合は、SWBC 船型の高い輸送効率による燃料費削減から、Clarkson によるベンチマーク船に比べて、燃料費の構成が少ないことが顕著となる。この要因から、ゼロエミッション船では、Clarkson によるベンチマーク船が 2050 年に利益がプラスになるのに対して、SWBC 船型は 2040 年より前に利益がプラスになる。将来の脱炭素燃料が高価格であることを想定すると、SWBC 船型の競争力が高いと判断できる。

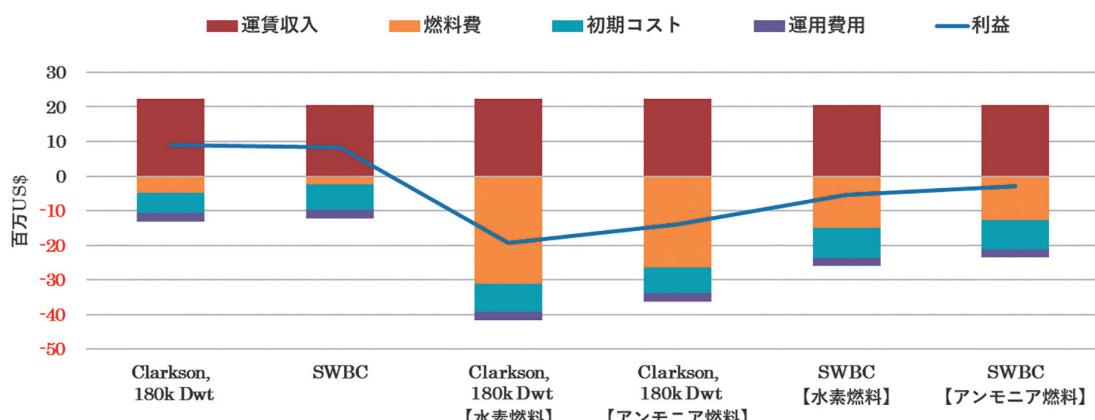


図 5.12 2030 年を想定した対象船舶の利益と収支構成

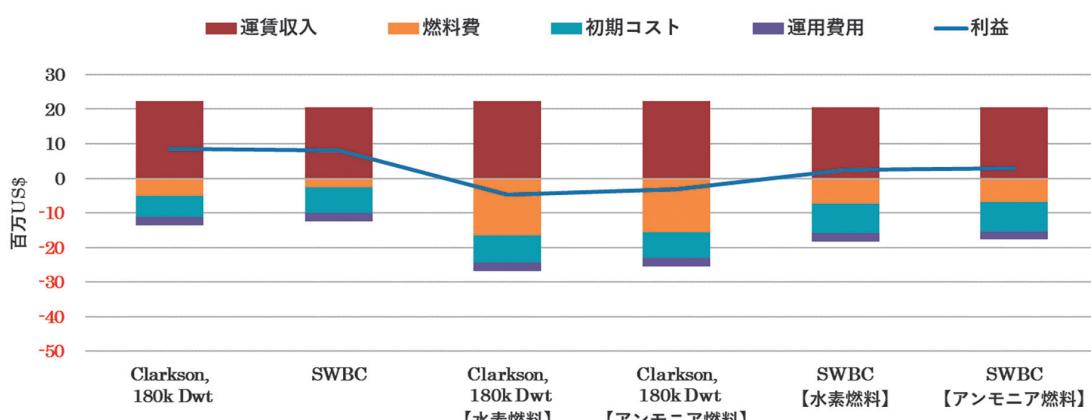


図 5.13 2040 年を想定した対象船舶の利益と収支構成

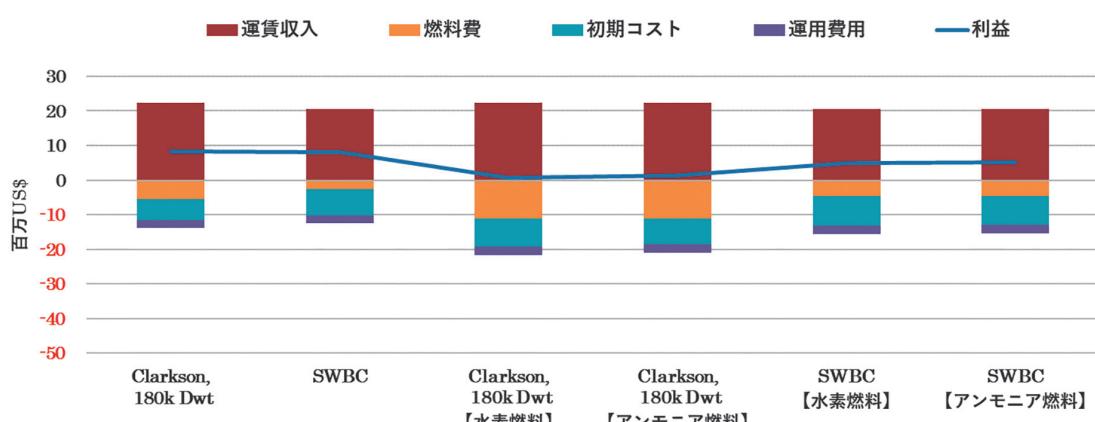


図 5.14 2050 年を想定した対象船舶の利益と収支構成

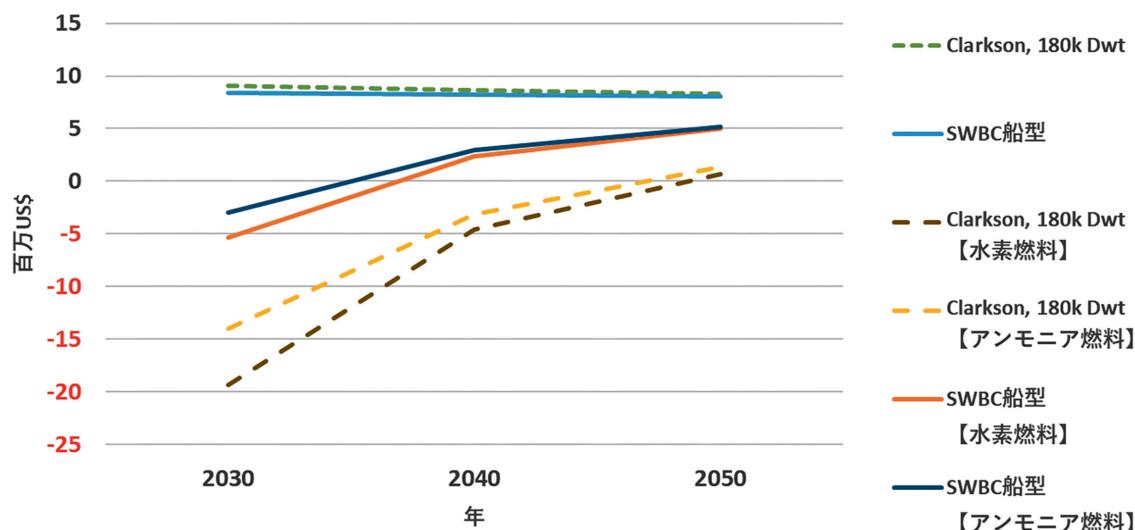


図 5.15 2030 年, 2040 年, 2050 年を想定した対象船舶の利益の推移

5.6 まとめ

本研究は、低速であるが輸送効率は高い SWBC について、近年のケープサイズ BC の運航形態と低・脱炭素燃料の研究動向に基づき経済性評価を行った。SWBC は、現在の日豪航路におけるケープサイズ BC の主となる DWT の大きさではないが、DWT が同程度の日豪航路を専従するケープサイズ BC が存在する。この日豪航路に専従する運航形態では、特に脱炭素燃料の使用を想定した時に、高い輸送効率の SWBC は従来船に比べて競争力がある。ただし、本研究では、大きな変動を持つ市況の影響や脱炭素燃料価格の予測に関して、固定値による経済性評価である。また、低速である SWBC は、貨物輸送の機会を損なう可能性もある。つまり、従来のケープサイズ BC は、SWBC に比べて船速が高い分、荷主の貨物需要に対応し、港湾に早く到着することで多くの貨物を獲得する柔軟な運航を実施している可能性がある。以上の点は、中国等を加えた対象航路の拡張、貨物需要の特性も考慮した運航形態の分析、経済性評価における感度分析等を実施することで更なる考察を行う必要がある。

6. 脱炭素燃料を使用する船舶の安全基準

6.1 概要

大気汚染防止の観点から、次世代の船舶燃料として天然ガス等の低引火点燃料の使用に対する機運が高まり、IMO の貨物運送小委員会 (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers, CCC) において、低引火点燃料を使用する船舶の義務的な安全基準として国際ガス燃料船安全コード (International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels, 以下、IGF コード) が策定され、2017 年 1 月に発効した。IGF コードは、従来の油燃料に比べて引火点が低く、漏えい時に爆発性雰囲気を形成する可能性が高い低引火点燃料を、船内で安全に貯蔵、供給及び使用するための安全設備の要件を規定したものである⁴⁷⁾。その後、船舶における様々な低・脱炭素燃料の使用に対応するため、IGF コードに関連したガイドラインとして、メタノール・エタノールを燃料として使用する船舶の安全に関する暫定ガイドライン (MSC.1/Circ.1621)，燃料電池を搭載する船舶の安全に関する暫定ガイドライン (MSC.1/1647) 及び LPG を燃料として使用する船舶の安全に関する暫定ガイドライン (MSC.1/Circ.1666) が相次いで承認された。IGF コード及びメタノール燃料船ガイドラインの概要は文献等^{48), 49)}も参考にされたい。海技研では、これらの基準策定にあたり、研究者を派遣し我が国提案の実現に向けた技術的な支援を継続的に行ってきました。

近年は、国際海運から排出される温室効果ガス (Greenhouse Gas, GHG) の削減目標を定めた GHG 削減戦略の達成に向け、IMO では水素燃料船及びアンモニア燃料船の安全要件の策定に向けた議題が設置され、審

議が進められている。水素燃料船及びアンモニア燃料船のガイドライン案の策定においても、これらの基準の検討過程において採用された安全のコンセプトや策定された基準をベースに、それぞれの物性の違いを考慮した検討が進められてきた。

6.2 水素を燃料に使用する船舶の安全ガイドライン案の審議状況

水素燃料を使用する船舶の安全ガイドライン案は、水素を燃料として使用する船舶の安全要件を規定するべく審議が行われている。当該ガイドライン案は、主に IGF コードの枠組みや要件を取り入れつつ、船内の配置、燃料タンク、材料、燃料配管、バンカリング、火災安全、防火、換気、危険場所、さらに特性を踏まえた要件として、液化水素運搬に関する暫定勧告 (MSC.420 (97)) の要件等を参考にし、低温脆性、水素脆性及び透過に対応した材料の選定、低温液体の危険から的人体の保護や配管等に空気が凝縮して付着することを防止する対策、広い可燃範囲に対応した消火設備及び無色の火炎を考慮した火災検知の設置等の要件を追加している。2024 年 9 月に開催予定の第 10 回貨物運送小委員会 (CCC10) において、当該ガイドライン案の最終化に向けた審議が行われる予定である。

6.3 アンモニアを燃料に使用する船舶の安全ガイドライン案の審議状況

アンモニア燃料を使用する船舶の安全ガイドライン案も、主に IGF コードの枠組みや要件を取り入れつつ、船内の配置、燃料タンク、材料、燃料配管、バンカリング、火災安全、防火、危険場所、毒性区域、換気及びモニタリング等の要件を規定している。また、アンモニアの特性を踏まえた要件として、国際液化ガス運搬船規則 (The International Code of the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk, IGC コード) における貨物としてアンモニアを運搬する船舶に求められる特別要件等を参考に、応力腐食割れに對応した材料の選定、アンモニアの毒性による危険から的人体を保護する保護具や除染シャワーの設置要件等を追加している。当該ガイドラインは、特にアンモニアの毒性に対する対策として、燃料タンクや燃料配管のページ / ガスフリー等の通常の運航時に実施するオペレーションにおいて、高濃度のアンモニアの大気放出による毒性の影響を軽減する処理装置の設置を求める要件、緊急時のアンモニア放出するベントポスト出口の高さや隔離距離要件及び開口や保護すべき区画についての配置要件等が規定されている。また、いくつかの船級では、当該ガイドライン案の検討の進捗を踏まえ独自のガイドラインを発行しているため、参考にされたい³⁵⁾。前述の水素燃料船のガイドライン案同様、当該ガイドライン案も、2024 年 9 月に開催予定の CCC10 において、最終化に向けた審議が行われる予定である。

6.4 まとめ

本報告では、主に IMO において策定してきた低・脱炭素燃料を使用する船舶の安全基準の概要及び水素燃料並びにアンモニア燃料を使用する船舶の安全ガイドライン案の検討状況を紹介した。海技研では、これらのガイドライン案の最終化に向けた審議に対し、引き続き貢献していく。

7. まとめ

GHG 排出ゼロの目標達成のため必須と考えられる脱炭素燃料を利用する舶用機関の開発や実船搭載は、各国で進められており、技術的には近い将来、水素・アンモニアなどの脱炭素燃料が利用可能となると考えられる。しかしながら、これらゼロエミッション船の本格的な市場投入においては、船価だけでなく、燃料コストの著しい増加が予測される。このため、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、大幅な輸送コスト増加の抑制を可能とする船型と運航形態の検討をおこなった。

本研究で設計した低速幅広バルクキャリアは研究的要素も持たせるため、主要目、特に船幅喫水比は敢えて過去の研究事例で取り扱ったことがない程大きめに設定した。低速幅広バルクキャリアの線図は JBC 船型をベースに船型ブレンディング手法で生成したシリーズ船型の中から選択しており、推進性能の最適化の余地は残されているものの、輸送効率を劇的に改善させるためには必須の航海速力の低速化により、従来の

設計条件では不可能であった程度まで幅広化を進めることができることを示した。低速幅広バルクキャリアが実際の船隊に加えられる場合は、投入航路や想定貨物、載貨重量、設定船速などによりその都度船型の検討が必要となるが、本報告で示した検討結果はその一助となると考えている。

また、経済性評価では輸送効率が高い低速幅広バルクキャリアに対して日豪航路を専従するケープサイズバルクキャリアの運航形態を参考して検討を行った。特に脱炭素燃料の使用を想定した時に、高輸送効率の低速幅広船型は従来船に比べて競争力があることがわかった。ただし、本研究では、大きな変動を持つ市況の影響や脱炭素燃料価格の予測に関して、固定値による経済性評価を行った。また、従来船型より航海速力が低い低速幅広船型は、貨物輸送の機会を損なう可能性もあるため、さらなる運航形態の分析や経済性評価の感度分析等を実施する必要があると考えられる。

謝　　辞

低速幅広肥大船の研究遂行に際しては、一般財団法人日本造船技術センターの金井健氏、新郷将司氏に多大なご指導を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

References

- 1) IMO, 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships (Resolution MEPC.377(80)).
- 2) Global Maritime Forum, The Implications of the IMO Revised GHG Strategy for Shipping (2023)
<https://www.globalmaritimeforum.org/publications/the-implications-of-the-imo-revised-ghg-strategy-for-shipping>
 (Accessed 29 April 2024).
- 3) IMO, Fourth Greenhouse Gas Study 2020, (2021).
- 4) Ministry of the Environment, Act on promotion of global warming counter measures, <https://www.env.go.jp/content/900440195.pdf> (Accessed 9 April 2024) (In Japanese).
- 5) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: Report of Study Group for the Promotion of Carbon Neutrality in Domestic Shipping (24 December 2021), <https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001447040.pdf> (Accessed 29 April 2024) (In Japanese).
- 6) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism : 5th Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism Basic Technology Plan, <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001479986.pdf> (Accessed 9 April 2024) (In Japanese).
- 7) Ministry of Economy, Trade and Industry : Green Growth Strategy for 2050 Carbon Neutral, https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf (Accessed 9 April 2024) (In Japanese).
- 8) IEA : Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector, (2021).
- 9) MAN Energy Solutions: Shipping en route to Paris Agreement overshoot, (2022).
- 10) BP : Energy Outlook 2023 edition, <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2023.pdf> (Accessed 29 April 2023).
- 11) DNV : Maritime Forecast to 2050, 2021 edition, <https://www.dnv.com/publications/maritime-forecast-to-2050-2021-edition-185650/> (Accessed 21 February 2023).
- 12) IRENA and AEA: Innovation Outlook: Renewable Ammonia, (2022), <https://www.irena.org/publications/2022/May/Innovation-Outlook-Renewable-Ammonia> (Accessed 26 May 2024)
- 13) Kawakita, C., Ichinose, Y., Fukasawa, R., Kanai, T. and Shingo, S.: Efforts to Reduce GHGs by Using a Slow Wide Blunt Ship, Journal of JASNAOE, No.34 (2022), pp.221-227.
- 14) Hirata, N. et al.: Experimental Data for JBC Resistance, Sinkage, Trim, Self-Propulsion Factors, Longitudinal Wave Cut and Detailed Flow with and without an Energy Saving Circular Duct, Numerical Ship Hydrodynamics, An As-

- essment of the Tokyo 2015 Workshop (Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics Book 94), Springer(2021), pp.23-51.
- 15) Ichinose, Y., Tahara, Y. and Kume, K.: A Construction and Evaluation of Hull-form Database for Domestic Vessels with Regulation on Gross Tonnage -Development of a Prototype for 749GT-type Domestic General Cargos-, Annual Autumn Meeting of JASNAOE 2017 Proceedings (2017), pp.51-62.
 - 16) Ohashi, K., Hino, T., Kobayashi, H., Onodera, N. and Sakamoto, N.: Development of a structured overset Navier-Stokes solver with a moving grid and full multigrid method, Journal of Marine Science and Technology (2019), pp.884-901.
 - 17) Kume, K., Kawakita, C., Kawashima, H., Kawanami, Y., Shiraishi, K., Ichinose, Y., Arakawa, D., Hiroi, T., Sawada, Y., Fujisawa, J., Wako, D., Fukasawa, R., Kuroda, M., Hamada, T., Kaneko, A., Omori, T., Suzuki, R., Nakaniishi, T. and Wanaka, S.: Innovative Energy-saving Technologies for GHG Reduction, Papers of National Maritime Research Institute, Vol.23 No.2 (2023), pp.63-85.
 - 18) Tsujimoto, M. and Orihara, H.: Performance Prediction of Full-scale Ship and Analysis by Means of On-board Monitoring (Part1 Ship Performance Prediction in Actual Seas), Journal of Marine Science and Technology (2018), pp.16-33.
 - 19) Yaginuma, A. and Okuni, K.: Mitsui O.S.K. Lines' initiatives toward alternative fuels, KANRIN, Vol.81 (2018), pp.18-21. (In Japanese)
 - 20) HANSHIN DIESEL WORKS,LTD. webpage, <https://www.hanshin-dw.co.jp/info/2024/05/post-14.php> (Accessed 24 May 2024) (In Japanese).
 - 21) WinGD to supply methanol-fuelled engines for six green container vessels, <https://www.wingd.com/en/news-media/press-releases/wingd-to-supply-methanol-fuelled-engines-for-six-green-container-vessels/> (Accessed 24 May 2024)
 - 22) Yanmar sets sights on medium-speed, methanol dual-fuel engine, <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/yanmar-sets-sights-on-medium-speed-methanol-dual-fuel-engine-74153> (Accessed 24 May 2024)
 - 23) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Handout of the Study Group for the Development of Guidelines for Handling Biofuels on Ships, https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_tk7_000048.html (Accessed 9 April 2024) (In Japanese).
 - 24) New Energy and Industrial Technology Development Organization, Green Innovation Fund Project/Next Generation Ship Development 2022 Industrial Structure Transformation Field Working Group Report Materials, https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/industrial_restructuring/pdf/010_05_00.pdf (Accessed 9 April 2024) (In Japanese).
 - 25) TSUNEISHI GROUP Press Releases, <https://www.tsuneishi-g.jp/news/press/2021/07/32477/> (Accessed 28 May 2024) (In Japanese).
 - 26) BEH2DRO webpage, Port of Antwerp-Bruges & CMB.TECH launch the Hydrotug 1, world's first hydrogen-powered tugboat, <https://www.behydro.com/news-events/launch-hydrotug-1> (Accessed 9 April 2024).
 - 27) Niki, Y.: Ammonia dual fuel in 4-stroke engines, journal of the Japan Institution of Marine Engineering, Vol. 55-6 (2020), pp.745-751. <https://doi.org/10.5988/jime.55.745>.
 - 28) CO₂-free power generation achieved with the world's first gas turbine using 100% liquid ammonia https://www.ihc.co.jp/en/all_news/2022/resources_energy_environment/1197938_3488.html (Accessed 21 May 2024).
 - 29) A new chapter – ammonia two-stroke engines, <https://www.man-es.com/marine/products/two-stroke-engines/ammonia-engine> (Accessed 24 May 2024)
 - 30) Wärtsilä continues to set the pace for marine decarbonisation with launch of world-first 4-stroke engine-based ammonia solution, <https://www.wartsila.com/media/news/15-11-2023-wartsila-continues-to-set-the-pace-for-marine-decarbonisation-with-launch-of-world-first-4-stroke-engine-based-ammonia-solution-3357985> (Accessed 24 May 2024)

- 31) X-DF-A Ammonia Engine Documentation, <https://www.wingd.com/en/engines/engine-types/x-df-dual-fuel-ammonia/documentation/> (Accessed 24 May 2024)
- 32) J-ENG has started development of the UEC60LSH type main engine and expands it to ammonia-fueled engine, <https://www.j-eng.co.jp/en/news/2023/20230530.html> (Accessed 24 May 2024)
- 33) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism webpage, https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_tk7_000041.html (Accessed 9 April 2024) (In Japanese).
- 34) Wüthrich, S. et al.: Optical investigation and thermodynamic analysis of premixed ammonia dual-fuel combustion initiated by dodecane pilot fuel, Fuel Communications, Vol. 12 (2022) 100074.
- 35) Vקtentin, S. et al.: Characterization of ammonia spray combustion and mixture formation under high-pressure, direct injection conditions, Fuel Vol. 333 (2023) 126454.
- 36) DNV : Maritime Forecast to 2050, 2021 edition, <https://www.dnv.com/publications/maritime-forecast-to-2050-2021-edition-185650/> (Accessed 24 February 2023).
- 37) Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping : Industry Transition Strategy October 2021, <https://www.zerocarbonshipping.com/publications/industry-transition-strategy/> (Accessed 21 February 2023).
- 38) Adachi, M. and Kosaka, H.: CAPEX of bulk carrier and container ship with installing equipment for low emission, Proceeding of 91st Marne Engineering Annual Meeting, No.110 (2021), pp.121-122.
- 39) Verbruggen, J.J.: Powering a representative ROPAX ferry in 2050 with minimal greenhouse gas emissions, Thesis for the degree of MSc in Marine Technology in the specialization of DPO (2018).
- 40) Grahn, M., Taljegard, M., Bengtsson, S., Andersson, K.m, Johnson, H., Cost-effective choices of marine fuels under stringent carbon dioxide targets, Proceedings of 3rd International Conference on Technologies, Operations, Logistics and Modelling in Low Carbon Shipping, (2013).
- 41) Taljegard, M., Brynolf, S., Grahn, M., Andersson, K., and Johnson, H., Cost-Effective Choices of Marine Fuels in a Carbon-Constrained World: Results from a Global Energy Model, Environmental Science & Technolgy, Vol.48, Issue 21, (2014), pp.12986-12993.
- 42) Niels de Vries, Safe and effective application of ammonia as a marine fuel, Thesis for the degree of M.Sc. in Marine Technology in the specialisation of Marine Engineering, (2019).
- 43) Kim, K., Roh, G., Kim, W., and Chun, K., A Preliminary Study on an Alternative Ship Propulsion System Fueled by Ammonia: Environmental and Economic Assessments, Journal of Marine Science and Engineering, vol.8, Issue 3, No.183, (2020).
- 44) Geertsma, R., Krijgsman, ir. M., Alternative fuels and power systems to reduce environmental impact of support vessels, Proceedng of Marine Electrical and Control Systems Safety Conference (MECSS), (2019).
- 45) Clarkson Research Service Limited: Sources & Methods for the Shipping Intelligence Weekly, <https://www.clarksons.net/archive/research/archive/SNM/> (Accessed 21 February 2023).
- 46) Solakivi, T. et al.: Cost competitiveness of alternative maritime fuels in the new regulatory framework. Transportation Research Part D: Transport and Environment Vol.113 (2022), 103500.
- 47) Nishifuji, K., Uenishi, Y. and Sakai, R.: Design Requirements for Gas Fueled Ships (IGF Code), Marine Engineering, Vol. 51 No. 1 (2016), pp. 3-7. (In Japanese).
- 48) Matsumoto, T., Akagi, T. and Harada, M.: Safety Requirements for Structures and Facilities of Methanol Fueled Ships, Marine Engineering, Vol. 58 No. 4 (2023), pp. 520-525. (In Japanese).
- 49) Nishifuji, K., Nippon Kaiji Kyokai: Outline of Safety Guidelines for Ships Using Ammonia as Fuel, Marine Engineering, Vol.58 No.2 (2023), pp. 218-224 (In Japanese).