

【特集 海事産業の未来への展望と課題】

《特別寄稿》

わが国は、地球温暖化に対処するために、温室効果ガス（GHG）排出削減のための国際的施策の策定・推進に取り組んでいます。産学官公の連携による「国際海運 GHG ゼロエミッション」プロジェクトも、その一環であり、海運業界や海事関係機関が中心となって、石油以外の各種代替エネルギーやバッテリーや風力等によるゼロエミッション船の実用化に向けての研究が進んでいます。

今回採り上げる「ウィンドチャレンジャー・プロジェクト」は、2009年に東京大学が主宰する産学共同研究プロジェクトとして起ち上げられ、2019年には、その根幹技術である「硬翼帆式風力推進装置」の設計に対して、(一財)日本海事協会より基本承認(AIP)が得られました。実用化に大きく近づいたこの機会に、本プロジェクトの研究代表を務めておられる大内氏に解説して頂きました。

風エネルギーを使用した船舶のゼロエミッション化

大 内 一 之

(株)大内海洋コンサルタント

目 次

1. 外航商船技術モデルの変遷
2. GHG 排出削減とゼロエミッション船の候補技術
3. ウィンドチャレンジャー計画
4. ゼロエミッション帆船の基本構想
5. 84,000DW バルカー型ゼロエミッション帆船の試設計
6. 今後の検討課題
7. 結言

1. 外航商船技術モデルの変遷

人類の歴史上の特筆すべき事象として、15世紀からポルトガル・スペインを先駆としたヨーロッパを起源とする大航海時代の活動がある。コロンブスのアメリカ大陸発見、バスコ・ダ・ガマのインド航路開拓、マゼランの西回り世界一周などで、当時の船長 25m 級の木造の帆船という手段でも、大洋を長期にわたって航海することが可能であることが実証され、大洋というこれまで未利用であった大陸間の洋上交通路の開拓・利用が始まった¹⁾。それ以降、これまで個々に独立した形で歴史と文化を積み上げてきた遠隔の文化圏の間の交流・交易が始まり、これを担う唯一のインフラとして航洋船舶及び洋上交通路は、技術的にも社会的にも成長・発展を遂げ洗練され定着し、現在の人類のグローバル化と繁栄に

大きく貢献している。

一方、20 世紀初頭にはライト兄弟が飛行機を発明し、その後驚くべきスピードで技術的發展を遂げた飛行機は、21 世紀後半には長距離の高速輸送手段のインフラとして定着している。しかし乍ら、何といても密度の小さい空気の流れによる翼の揚力で機体と貨物を空中に持ち上げて飛行するために、高速な流れを翼に当てる必要があるため多大なエネルギーの消費が避けられず、輸送対象が人と軽い貨物のみに限られ、対象貨物は限定的とならざるを得ない。現に国際間の貨物輸送の 99.6%（重量ベース）は船舶により輸送されており、この比率は今後も変わることは無いと思われる。このような根本的原理的な理由から、船舶は長距離の航洋交通運輸手段として中心的で欠くべからざる存在として、今後とも極めて重要なインフラであり続けることを認識すべきであろう。

大航海時代の船は、船体構造としては木造であり、船の推進は風の力を受けて推進力を生み出す帆によって得られるものであった。図 1 にコロンブスの旗艦サンタマリア号の絵を示す。その後、帆船は船としての大型化、帆の材質・形状の進歩など、徐々に改良を重ね 18 世紀の中葉には図 2 に示すカティーサーク号に代表されるようなクリッパーと云われる高速帆船が開発され絶頂期を迎えるが、同時期に進展していた産業革命の成果としての蒸気機関によって駆動される外輪船及びプロペラ船の発明によって急激に駆逐されていった¹⁾²⁾。クリッパーのような純帆船では風の強弱のみで船の速力が決まる所謂「風任せ」状態なので、船のスケジュールを予定通り保持することが難しく、輸送業の重要な目的要素である定時性の確保が蒸気船に比べて劣ることになり、18 世紀末には急激に商船の世界から姿を消していった。蒸気船から始まった機動船も 1807 年にフルトンが初の石炭炊き蒸気レシプロ機関駆動の外輪船「クラーモント号」をニューヨークのハドソン川で走らせた後²⁾、特に外洋航行船では波や揺れに強いスクリュプロペラ船が取ってかわり、また、蒸気レシプロ機関も 20 世紀に入り蒸気タービン機関に代わり、更に熱効率の高い石油燃料の内燃機関、ディーゼル機関と変遷を遂げた。

このような変遷が続いた後、20 世紀の前半には外洋航行商船の一般的コンセプトとしては、鋼構造でディーゼル機関・スクリュプロペラ推進の鋼船に収斂されていき、第 2 次世界大戦以降もこの流れは変わらず、船舶の推進コンセプトは周辺技術の発展などを取り入れつつも基本的な要素は踏襲されている。図 4 に代表例として日本/欧州航路定期貨物船金華山丸を示す³⁾。1970 年代に起きたオイルショックによる燃料油価格の高騰により、エンジン・プロペラ或いは船体形状などの要素機器技術の省エネ化の研究開発の成果により、これらを統合した省エネ船が開発されたが、基本的な推進コンセプトは現在でも変わっていない。

一方で、20 世紀後半からの世界経済のグローバル化・海上物流量の増加に伴い、船の大型化・専用船化に開発の焦点が向けられた。特に顕著だったのはこれまでにない種類の貨物が登場し貨物積載区画のイノベーションが図られたことである。例えば、石油プロダクト製品あるいは液化天然ガス（LNG）や液化プロパンガス（LPG）の輸送需要の増大に対応するために、輸送物特性に特化した専用タンカーの実現、また 1960 年代から始まった一般貨物の海陸コンテナ貫輸送を実現したコンテナライゼーションのためのコンテナ専用船の登場とその大型化、自動車の輸送のみに特化した自動車専用船（PCC）に関する開発が進んでいる³⁾⁴⁾。

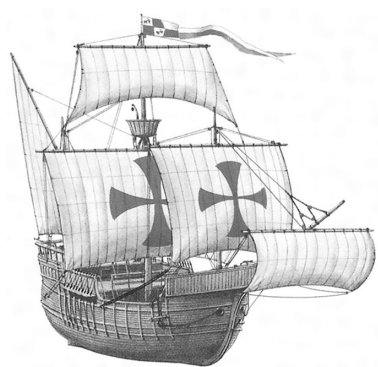


図1 サンタマリア号



図2 カティーサーク号

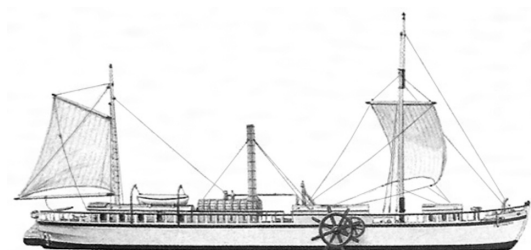


図3 クラームント号

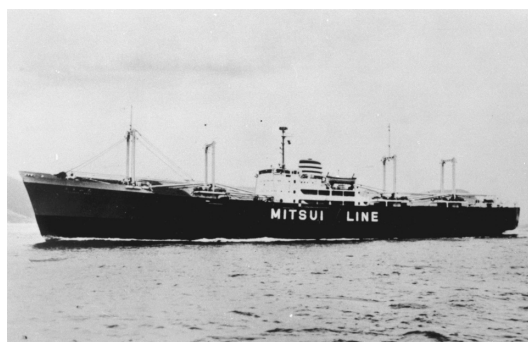


図4 金華山丸



図5 コンテナ船

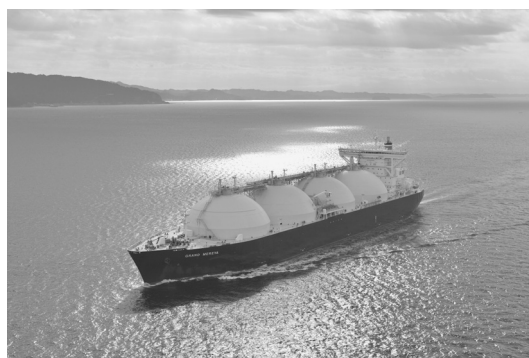


図6 LNG船

(※本稿の図表の出典は後記します。)

2. GHG排出削減とゼロエミッション船の候補技術

21世紀に入り、地球温暖化・気候変動・環境問題が顕在化してきており、その元凶がCO₂を中心とするGHG（Green House Gas:温暖化ガス）の空気中での濃度上昇であることが判明している。このまま規制を設けずCO₂排出を続けると、取り返しのつかない気候変動・

環境悪化が起こることが明らかになってきた。2015 年の COP22 パリ協定では、地球の温度を産業革命前より 2℃下げる、そのために 21 世紀後半には GHG の増加量を地球全体でゼロに抑えることが決議された。これを受けて IMO（International Maritime Organization）では 2018 年の総会で、国際海運での GHG 排出量の数値目標を以下とすることを決定した。

- ① 2050 年までに排出量の総量を 2008 年の 50%以下とする。
- ② 今世紀の後半のなるべく早い時期に排出量をゼロとする。

この決議は具体的に実行するためには、船の推進エネルギーの殆んど全てを供給している油・ガス等の化石エネルギーからの脱却し、CO₂ 排出のない再生可能エネルギーへの転換が必要となる。従って、今後の海運・造船界のイノベーションは、脱化石燃料船、CO₂ 及び NO_x や SO_x 等の有害物質を排出しないゼロエミッション船に向かって大きく舵を切っていく必要があり、次世代のグローバルな海運・造船の技術開発の焦点は、炭素の介在しない完全なゼロエミッション船の開発に移ってゆくものと思われる⁹⁾。

表 1 に従来船との種々のゼロエミッション候補船の比較において、船の推進エネルギー源、動力発生装置、推力発生装置などの必要技術要素を抽出し、その得失についての検討結果を示す。及びその特長と問題点を併せて示す。尚、ここでの CO₂ フリー水素とは生成由来が再生可能エネルギー等の CO₂ を出さないエネルギー源である物を指す。

表 1 ゼロエミッション船の候補

種類	エネルギー源	動力発生装置	推進装置	備考
従来船	石油・ガス燃料	内燃機関	プロペラ	多量の CO ₂ 排出
原子力船	ウラン核分裂熱	蒸気タービン機関	プロペラ	ウランの供給制限、社会受容性
風力船	海洋風	翼帆	翼帆	弱風時の推力不足
水素エンジン船	CO ₂ フリー水素	水素内燃機関	プロペラ	CO ₂ フリー水素の入手難、NO _x 排出
燃料電池船	CO ₂ フリー水素	燃料電池	電動プロペラ	CO ₂ フリー水素の入手難
蓄電池船	CO ₂ フリー電力	リチウム電池	電動プロペラ	CO ₂ フリー電力の入手難、電池容量不足
バイオ燃料船	バイオ燃料	内燃機関	プロペラ	バイオ燃料の入手難、食料耕地面積圧迫
CO ₂ 回収船	石油・ガス燃料	内燃機関	プロペラ	回収装置搭載要、CCSの社会受容性

原子力船については、軍艦・潜水艦等で実用され数多くの艦艇が世界中で航海を行っており、技術的にも確立されている。日本でも 1960 年代に国家プロジェクトとして原子力商船「むつ」が建造されたが、環境アセスメント等の問題で実用的運航が実現することはなかった。CO₂ 回収船は従来の化石燃料船で排出する CO₂ を本船で回収し、陸揚げして CCS（Carbon Capture and Storage）により地中奥深くに貯留廃棄するものであるが、双方とも放射性廃棄物、大量の CO₂ 廃棄物に対する危険性と安全の担保、環境問題に対する社会的受容性、コストについての問題が大きく、商船への適用は現状では難しい。また、バイオ燃料についても多量の消費は食料用の耕地面積を狭めてしまうことにつながり、コストも高く問題が多い。蓄電池船については、現状の技術では長距離航海の大型商船には容量が追い付かず、今後の研究開発で桁違いの軽量化が行われないう限り、主たる推進エネル

ギー源にはなり得ない。また、エネルギー供給システムとして蓄電池にチャージする陸上商用電力がCO₂排出の多い火力発電由来のものでは、ゼロエミッションとは言えない。

こうしてみると、ゼロエミッション船に相応しいコンセプトは風力推進船、その中でも長い歴史と実績のある帆船ということになる。帆船は19世紀後半までは唯一の航洋交通手段として黄金時代を築いていたが、産業革命により動力機関が発明されてからは、練習船、観光船は別にして殆ど姿を消した。帆船の交通手段として最大の弱点は風任せで定時性が欠如している点であり、第1章でも述べたように、これを解決した動力船に徐々に取って代われ、19世紀末には商船としては完全に姿を消した。

このような経緯から、次世代の帆船は風のない時もゼロエミッションで航海できるエネルギー源を持つ必要がある。海事社会だけでなく、陸上・航空輸送手段も含め、持ち運び可能なエネルギーは、地球温暖化問題への対策として今後石油から水素に代わっていく方向にあり、この流れの中で船の世界でも風のない時の動力エネルギーとしては水素が求められるであろう。しかし、ゼロエミッションを実現するためには水素がどのように作られるかが問題となる。水素は一般的に水の電気分解により生産されるが、その電力が火力発電等のCO₂排出を伴うものであればゼロエミッションは達成されない。ゼロエミッションの達成には再生可能エネルギー由来の水素である「CO₂フリー水素」が求められる。

以上の考察から、最も現実的なゼロエミッション船は「風力エネルギー」と再生可能エネルギー由来の「CO₂フリー水素」の組み合わせたシステムが有力と思われる。表1の区分では、NO_xの問題も考慮して「風力船」と「燃料電池船」の組み合わせが最も相応しいと考えるものである。

3. ウィンドチャレンジャー計画

筆者らは現在、上下伸縮・旋回する大型の硬翼帆によって風のエネルギーを効率的に船の前進エネルギーに変換し、大型商船の燃料消費量を抜本的に削減する「ウィンドチャレンジャー計画」を推進中である^{10) 12) 14)}。このウィンドチャレンジャー帆の特徴は、従来の帆船で使用されていた布製の軟帆に代えて、FRP複合材の翼型をした硬帆としたことある¹¹⁾。硬翼帆とすることにより、翼の性能が抜本的に向上すると共に帆を操作するリグが大幅に簡素化できる¹³⁾。また、帆と帆に内蔵したマストが一体となって上下伸縮がテレスコピックにスライドして行われることであり、これにより展帆時と縮帆時の帆の高さと面積を大きく変化させることができる¹⁴⁾。

図7に、ウィンドチャレンジャー帆を1基搭載した84,000DWのバルクキャリアの展帆時と縮帆時のCGイメージ図を示す。本船の主要目は、長さ：223.0m、幅：36.5m、型深さ19.0m、計画喫水：12.2m、主機出力（MCO）：9,965kW、航海速力：14.3knot（85% MCO, 15% Sea Margin）、燃料消費量：34トン/日、帆面積：900m²である。



図7 ウィンドチャレンジャー硬翼帆（展帆時及び縮帆時）

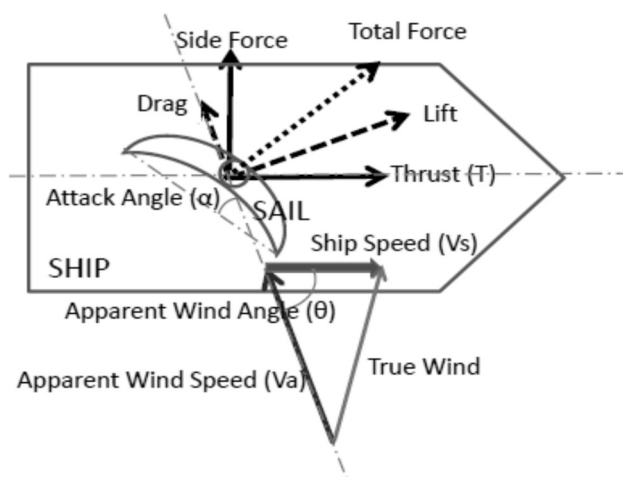


図8 帆と船に作用する力

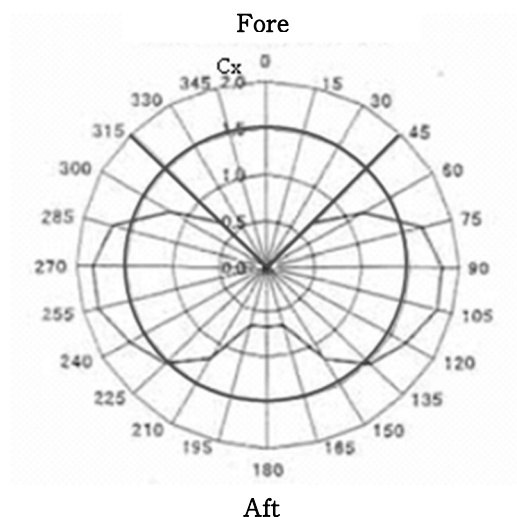


図9 ポーラーダイアグラム

図8に帆に作用する風の力及び船に作用する推力の模式図を示す。船の推力（Thrust）は、翼が風から受ける揚力（Lift）と抗力（Drag）の合力（Total Force）の前進方向成分である。また、推力（Thrust）と同時に横力（Side Force）も働き、船体に横傾斜（Heel）と横流れ（Drift）をもたらす。図9には、風の変化による帆の発生する推力強さを表示したポーラーダイアグラムを示す。翼型断面の帆の場合、横風（ $60^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 、 $210^{\circ} \sim 300^{\circ}$ ）では大きな推力が得られる。しかし、正面風（ $315^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ）では全く推力は得られなく、真後ろからの風（ $150^{\circ} \sim 210^{\circ}$ ）でも推力は小さい。これは、翼が揚力を発生しない状態で使用しているからである^{5) 6)}。

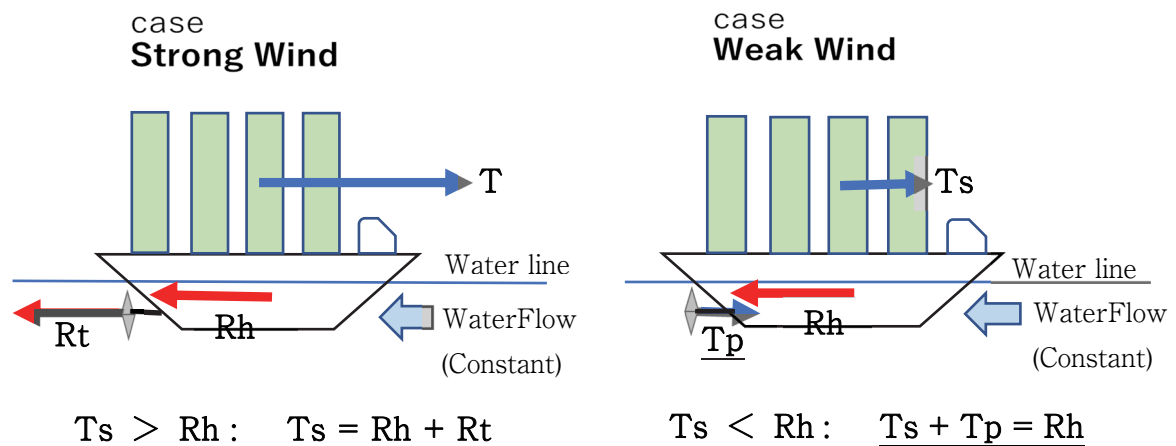
本船を用いて、横浜と東豪州のニューカッスル間の石炭輸送のシャトルサービスのシミュレーションを2004年のJR-25の気象・風況データを使って行った結果、満載・バラスト航海を含めた1年間の平均燃料消費量削減は約4.5%であった。またこの際の各航海の最小値は約3%、最大値は約8%であった¹⁷⁾。

4. ゼロエミッション帆船の基本構想

ここでは、商船としての定時性も備えた完全な CO2 の無排出船である、ゼロエミッション帆船 (ZESS : Zero Emission Sailing Ship) のコンセプト提案を行い、その可能性についての考察を行う。ZESS の基本構想及び特徴は以下のとおりである。

- ・ 船の推進を含めたすべてのエネルギーを海上風から調達する。
- ・ 風の強い時は、帆の推力で航行し、所定船速に必要な以上の風が吹いた場合は余剰の船速エネルギーを水中タービン・発電機を介して水素として船内に貯蔵する^{17) 18)}。
- ・ 風の弱い時は、帆の推力のみでは所定船速が保持できないので、貯蔵している水素により燃料電池で電力を得て電動機を介してプロペラを回し、所定船速を得る。
- ・ 水素の船内貯蔵には、有機ケミカルハイドライド法により、常温常圧で液体であるトルエン/メチルシクロヘキサン (MCH) 系の水素キャリアを使用する⁷⁾。
- ・ 風エネルギーの収集には、常に変化する風況に効果的に対応するために、帆面積変更と帆の方向が大幅かつ容易に制御できるウィンドチャンジャー帆を装備する。

図 10 に、一定速度で航行する船に対して、風の強い場合と弱い場合の帆・船体・タービン・プロペラに作用する力の関係を模式的に示す。



Where; T_s : Sail Thrust, T_p : Propeller Thrust, R_h : Hull Resistance, R_t : Turbine Resistance

図 10 ZESS に作用する力

上記の考え方に沿って船体及び各要素機器を就航航路の風況、気海象に合わせて適切な船速と定時性を担保出来るような性能・仕様を決定すれば、現状ディーゼル推進商船と同等な機能を持つゼロエミッション商船の実現が可能となる。

具体的には、第 3 章で示した述べたような大面積のウィンドチャレンジャー帆複数基を商船に搭載し、風が強く所定の船速を上回る海域を航行する場合は上回った分の推力を水中タービン及び発電機により吸収し電力に変換する。この余剰電力で水電解装置により水素を発生させ、それをトルエンと化合させメチル-シクロ-ヘキサン (MCH) を生成し貯蔵・輸送が簡便・安全に行える水素エネルギーキャリアとして、船内に貯蔵する^{17) 18)}。弱風時はこの MCH から水素を戻し、燃料電池に導き発電し、電動モーターによりプロペラを作

動させれば、弱風時でも所定の船速を常に保つことのできる自己完結型完全ゼロエミッション船の実現が可能となる^{19) 20)}。また、燃料電池、水素化装置、脱水素装置は反応の際に熱エネルギーの出し入れが生じるので、これらを統合的に利用すればシステムの効率が增加することになる⁷⁾。これらの必要要素機器とエネルギーフローを併せて図 11 に模式的に示す。

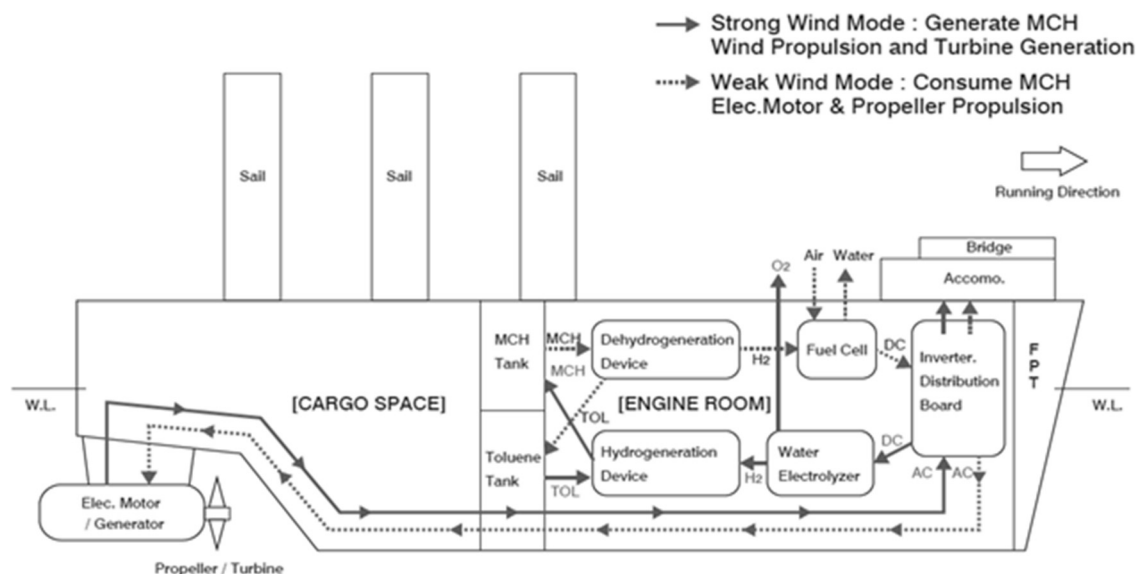


図 11 主要要素機器とエネルギーの流れ

この船は推進力・船内電源等の全てのエネルギーを帆によって獲得した風力エネルギーと、それに由来する本船内で生産した水素エネルギーでのみで航海できるので、海上風という再生可能エネルギーのみを使い、航海中の本船からの排出物は水（水蒸気）と酸素だけなので、完全なゼロエミッション船ということが出来る。また、船外からのエネルギー供給が不要であり、燃料・エネルギーの高騰などに対しても無関係であり、エネルギー安全保障上の価値も高いといえる。

5. 84,000DW バルカー型ゼロエミッション帆船の試設計

図 12 にゼロエミッション帆船の一例として 84,000DW バルカー型のゼロエミッション帆船（以下 ZESS (Zero Emission Sailing Ship) と略す）の概略一般配置を示す。また、表 2 にはその主要目を示す。

ここでは、強風時の横からの風速が 7 m/s 以上の場合は水素を生産、7 m/s 以下の場合は水素を消費という二つのモードで航海することを前提に設計している。

本船は MCH 貯蔵タンク容量を 1,000m³としており、この容量では、無風状態で帆の推力がゼロの場合でも燃料電池を作動させることにより、船速 10 ノットで約 10 日の連続航海が可能である。風をエネルギー源とする ZESS の設計にあたっては、航路・風況などの変化に充分対応出来るタンク容量を設定する必要がある¹⁵⁾。

図 12 に示すように、強風時に使用するタービンと弱風時に使うプロペラについては、ブ

レードピッチを可変にするなどして共用化して船尾に配置する。その際、船尾伴流によりタービン効率が低下しないよう船尾形状をスケグ付きバトックフロー船型とし、極力タービンに入る流速低下が少ないものとする⁸⁾。更に発電機/電動機内蔵型のポッド型システムを採用し、横流れの大きい帆船に対して常にタービンの方向を流れに正対する角度に調整・保持できるものとする。

居住区・操舵室・機関室（水素関連機器収納）・燃料タンク（トルエン/MCH）は船首部にまとめて配置する。水電解に必要な淡水については機関室内に従来型の船用造水機を装備する。

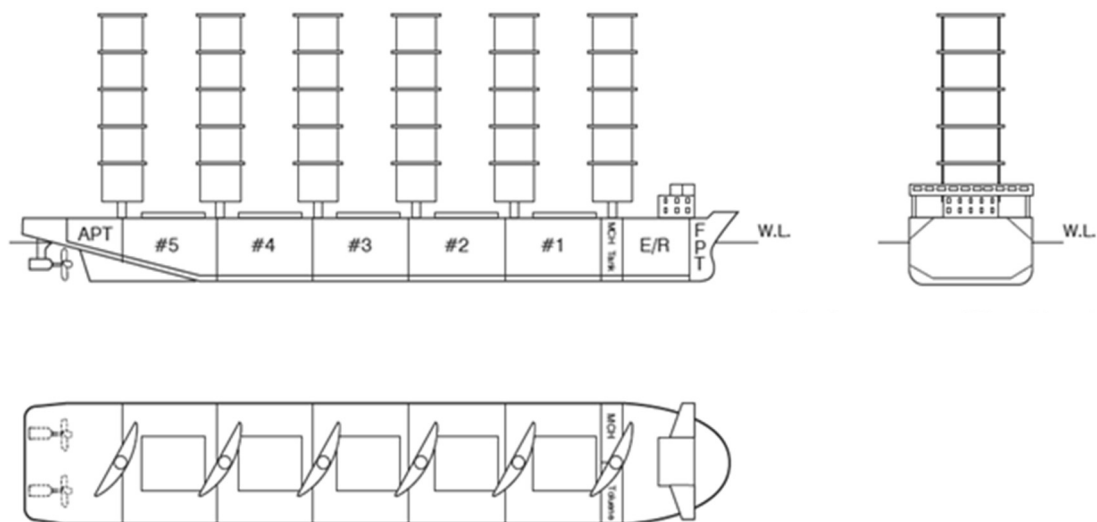


図 12 概略一般配置図

表 2 概略主要目

項目	数値	備考
全長	220.0 m	
全幅	36.0 m	
深さ	19.5 m	
喫水	13.0 m	
載貨重量	75,000 ton	
MCHトルエンタンク	1,000 m ³	各々
帆面積	10,000 m ²	
タービン直径	9.6 m x 2基	プロペラ共用
燃料電池	2,800 kW	
水素発生装置	50,000 Nm ³ /day	
平均航海速力	12 knot	平均風速7m/s

6. 今後の検討課題

ゼロエミッション帆船の実現に向けて、今後の検討課題として以下が挙げられる。

- ・水素キャリアの選択

ここでは有機ケミカルハイドライト（トルエン／メチルシクロヘキサン系）を想定するが、他にも液化水素、圧縮水素、アンモニア、水素吸蔵合金などが候補となると思われ、夫々について安全性、コスト、取り扱い、社会受容性などの比較検討が必要である。

- ・ウィンドチャレンジャー帆の軽量化

硬翼帆の内部にあって、帆の強度を支える伸縮式のマスト（スパー）は現在鋼製であるが、帆の面積及び高さの増大を可能とするためには、より軽くて強度の高い CFRP 等の軽くて強い複合材料の導入が必要である。。

- ・発電機/電動機及びタービン/プロペラの共用化

本船の航海は、強風時のエネルギー貯蔵モードと弱風時のエネルギー消費モードからなっており二つのモードを同時に使うことは無く、両方の性能・効率が減少しない範囲での共用化の方策を研究する。

- ・燃料電池のカスタム化

風速の変化・外乱の大きい実海域での運航に対して充分にカスタム化された水電解装置、燃料電池などの開発。

- ・要素機器の入熱排熱の統合的利用

燃料電池、水電解装置、水素化・脱水素装置等の各機器からの入排熱の有効利用と効率的運用。

- ・航海計画と航路選択、

気象予測、船速、定時性を考慮した運行プログラムの開発。

7. 結言

上下伸縮式の大型硬翼帆「ウィンドチャレンジャー帆」を所定の推力よりも充分に大きな余剰推力が出せる基数を装備し、強風時は余剰推力にて水中タービン発電を行い、水電解で水素を発生し水素キャリアであるメチルシクロヘキサン（MCH）を作り船内に貯蔵する。弱風時には MCH から水素を取り出し、燃料電池により電力を発生して電動機によりプロペラで推進する風エネルギーと風から作られる水素エネルギーのみで航海が可能なゼロエミッション帆船（ZESS）を提案し、フィジビリティスタディを行った。

本コンセプトは現在ほぼ 100%の商船が石油エネルギーによる機動船が、風を敵としてその影響を最小化して安全かつ効率的に運航しようと努力するに対し、逆に風を推進のためのエネルギーとして活用しようというものであり、本船の設計・運航に関しては、この基本的立場を十分に認識して取り組む必要がある。

必要とされる要素機器については、全て陸上・他産業で実用化されているものであり、今後の大きなブレークスルーが必要な技術はなく、第5章の今後の研究課題に示した要素機器の効率改良と船舶での使用に向けたカスタム化ができれば、2018 年の IMO の決議及び将来の水素社会の実現に向けて、最も有力な船舶推進方法の革新技術になることが期待される。

最後に、ケーブサイズバルカー（全長: 300m、DW: 18 万トン）をゼロエミッション帆船化したときの想像図を図 13 に示し本稿を終えるものとする。

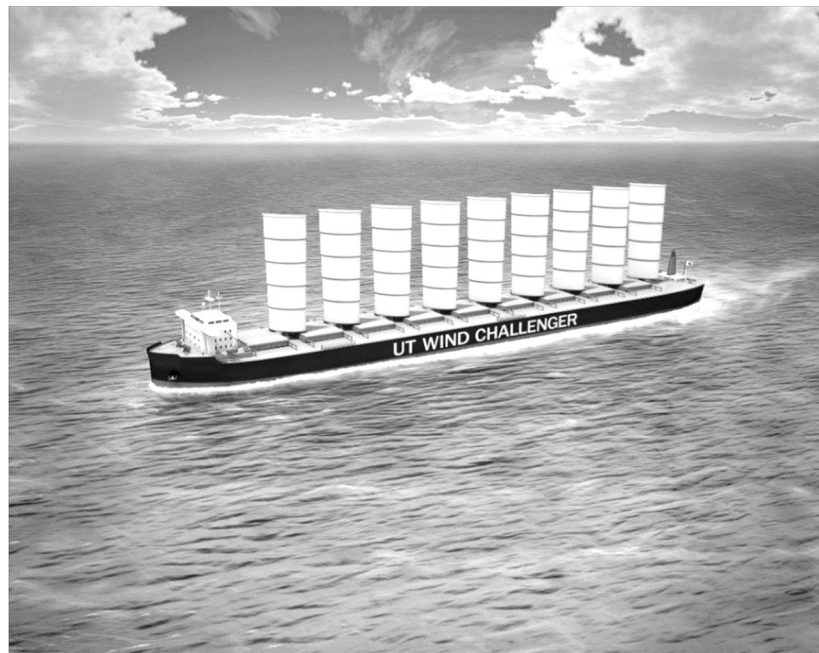


図 13 ゼロエミッション帆船想像図

参 考 文 献

- 1) Romola & R. C. Anderson, 松田常美訳：帆船 6000 年のあゆみ、成山堂書店、2004.6
- 2) 日本機械学会編：新・機械技術史、日本機械学会、2010.12
- 3) 大阪商船三井船舶編：創業百年史、大阪商船三井船舶(株)、1985.7
- 4) 日本造船学会編：日本造船技術百年史、日本造船学会、1997.5
- 5) Lars Larsson and Rolf E. Eliasson, 大橋且典訳：ヨットデザイン原論、1997.8
- 6) 増山豊：帆走工学、海文堂出版、2020.4
- 7) 水素エネルギー協会：水素の事典、有機ハイドライト、pp.386—392、朝倉書店、pp.386—392、2014.4
- 8) 関西造船協会：造船設計便覧第 4 版、海文堂出版、pp.357—359、1996.6
- 9) 国際海運 GHG ゼロエミッションプロジェクト：国際海運のゼロエミッションに向けたロードマップ、日本船舶技術研究協会、2020.3
- 10) 大内一之、鶴沢潔：低炭素社会へ向けての風力推進船の概念設計、第 21 回海洋工学シンポジウム論文集、日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会、2009.6
- 11) 鶴沢潔、木村學、宮田武志、金子彰則、大内一之：複合材料による大型伸縮式硬翼帆の基礎検討、日本船舶海洋工学会講演会論文集第 10 号、2010.6
- 12) K. Ouchi, K. Uzawa: Next Generation Sailing Merchant Vessel with Hard Wing Sails, Proceedings of 4th PAAMES and Advanced Marine Engineering Conference Singapore, 2010.12
- 13) 金井亮浩、大内一之、芳村康男、高須董：硬翼帆の単独特性に関する模型試験と CFD、日本船舶海洋工学会講演会論文集第 18 号、2014.5
- 14) 大内一之、鶴沢潔：ウィンドチャレンジャー計画-化石燃料船から風力推進船へ-、日本船舶海洋工学会誌 KANRIN 第 63 号、2015.11
- 15) 早稲田卓爾：ウィンドチャレンジャーの最適航路選定-風速予測データの活用-、日本船舶海洋工学会誌 KANRIN 第 63 号、2015.11
- 16) 大内一之編：ウィンドチャレンジャー成果報告会講演資料集、東京大学大学院新領域創成科学研究科海洋技術環境学専攻、2017.9
- 17) K. Ouchi and J. Henzie : Hydrogen Generation Sailing Ship - Conceptual Design and Feasibility Study-, OCEANS2017 Aberdeen, 2017.7
- 18) 大内一之、ジョール・ヘンジー：水素生産帆船-概念と可能性-、日本船舶海洋工学会 2017 年秋季講演会論文集、2017.11

- 19) 大内一之：ゼロエミッション帆船の概念設計、日本船舶海洋工学会 2019 年度春季講演会論文集、2019.6
20) K. Ouchi, T. Omiya, J. Henzie : Zero Emission Sailing Ship -Conceptual Design-, Wind Propulsion Symposium London, The Royal Institute of Naval Architects, 2019.10

図表出典

- 図1 サンタマリア号（画：野上隼夫/小学館『日本大百科全書（ニッポニカ）』より）
図2 カティサーク Krzysztof Belczyński 2015 年 2 月 23 日
CC 表示－継承 2.0 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>（カラー写真を白黒写真に改変）
図3 クラームント号（画：野上隼夫/小学館『日本大百科全書（ニッポニカ）』より）
図4 金華山丸（（株）商船三井 HP より「ふね遺産 金華山丸」）
<https://www.mol.co.jp/library/ship-heritage/index.html>
図5 コンテナ船（Ocean Network Express Pte. Ltd. 提供）
図6 LNG 船「GRAND MEREYA」（（株）商船三井提供）
上記 URL への最終アクセス日は、2020 年 11 月 25 日

上記以外の図表は全て、筆者作成。