


船舶のGHG削減策としての 風力推進*

Promotion of Wind Power as a Measure to Reduce GHG Emissions from Ships

田中 良和¹⁾
Yoshikazu Tanaka

Currently, the GHG problem is an urgent issue, but such as hydrogen etc., which is an alternative fuel candidate, have a lower energy density than petroleum and require energy when evaluated in terms of life cycle. Since wind power blows strongly without obstacles in the open sea, the use of wind power is being reviewed, modernized, and implemented. We will introduce various recent initiatives from the mechanism of wind power utilization.

KEY WORDS

Environment • Energy • Resources, Wind Power, Design/Production
Ship Wind Power Environment Thrust 

1 はじめに

自動車業界の本誌に船業界の筆者の記事を掲載いただけるのは光栄である。以下、最近の風力の推進利用について業界動向を紹介する。

そもそも自動車と船は交通手段としては共通であるが、大きく違うところが三つある。

自動車は地面をグリップして走るが、船は水の上を滑って進む点がひとつ。自動車は転がり抵抗は静止時からの動き出しが最大になるが、船のほうは海面をグリップしていないので、動き出しでは理論上抵抗はゼロとなる（自動車の空気抵抗が動き出しではゼロと同等）。菱垣廻船のところで述べるが、船は車のドリフト走行のように、船首方向と針路方向が少々ずれて航走している。

二つめは、自動車は開発にあたって実車でさまざまなテストができるが、船は実船の大きさにもよるが、約1/50のスケールモデルで性能試験を行うことが多い。自動車のように実車を使った衝突試験などは難しいので、机上の検討と実績での設計基準を作ることも多い。

三つめは、自動車は設計者も製造担当者も機器メーカーの担当者もユーザとして自動車に乗っているが、船は設計者や製造担当者や機器メーカーの担

当者も完成形や運航時の状況や使い方がわからないことが多い。ちょうど、故豊田章一郎氏の日経の追悼記事で「父親の喜一郎氏が昔家の周りで小さな車を運転し、ぐるぐる回ってひっくり返ったことがあったと述べられて、失敗しないと分からない」とあったのが印象的に思えた。実車でテストできないので保守的になりがちかもしれない。

さて、風力推進は蒸気船ができるまで約5千年間（エジプトとフェニキアの間で紀元前3千年頃に帆船での貿易の記録が残されている）は主推進力として利用してきたが、燃料が石炭から石油になって急速に風力推進は淘汰された。自動車も創世記に電気と石油で覇権をめぐってバトルがあったのと同様である。石油はエネルギー密度の高い、しかもポンプで噴射できる利便性があったのと、掘れば出てくるので安価で約100年間便利に利用させてもらった。

現在GHG問題が地球的に喫緊の課題となっているので、船も次世代燃料の対応に真剣に取り組んでいる。が、代替候補の水素やアンモニアやメタノールいずれも石油と比べエネルギー密度が低く、しかも合成しなければならないので高価である。また、製造段階でエネルギーが必要になるので、コスト増もさることながら、ライフサイクル（Well to Propeller）で評価すると代替燃料の使用量を減らす必要がある。そのためには自然エネルギーを活用する方法を考えなければならない。風力は太陽エネルギーの集積したもので外洋では障

* 2023年3月2日受付

1) 商船三井テクノトレード(株) 技術開発推進室/神戸大学客員教授
(101-0054 千代田区神田錦町2-2-1 Kanda Square 18F)
E-mail: yoshikazu.tanaka@molgroup.com

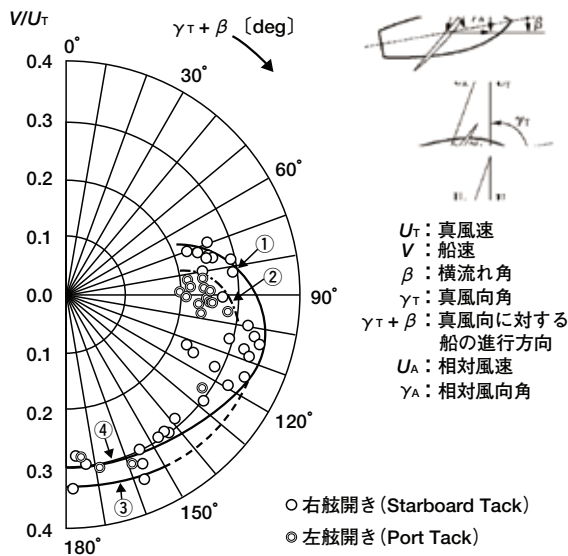


図1 実測された帆走速度(船速/真風速と真風向)のポーラー線図

害物がなく強く吹くことから、風力利用がSDGsの観点から見直され近代化され、実装も進んでいる。風力利用のメカニズムから最近のさまざまな取組みを紹介する。

2 風力利用のメカニズム

風力推進というと、帆掛け船で追い風しか利用できないと思われるかもしれない。

帆掛け船とされている菱垣廻船(排水量約150トン)を再現して計測した結果があるので紹介したい。筆者の恩師の故野本健作名誉教授が計測され報告書が残っている⁽¹⁾。

図1のポーラー線図で見ると、約60度の斜め向かい風から帆走が可能であったことがわかる(このポーラー線図は、円周方向に真風向を表し、半径方向にどの程度の速度が出るか記述したもので、船速/風速が目盛)。最も効率の良い角度は横風から120度の斜め後方で、風速の約35%(0.35)の速度が出ている。14 m/sの風で、約10 kt(18 km/時)の速力を意味する(図2)。

横風するときには横力も大きくなり、結果的に斜航角が生じてロスが生じる。図3の β (斜航角)は風向き60~90度で最大10度にもなる。風の横力と釣り合うよう船体を斜めに進ませ、船体を翼として水の横力を発生させる。このときの水抵抗も大きくなるが、その抵抗ロスも入れたものが図1で示した速度比率である。ちなみに外航貨物船



図2 横風の中、開き走りで快走する菱垣廻船

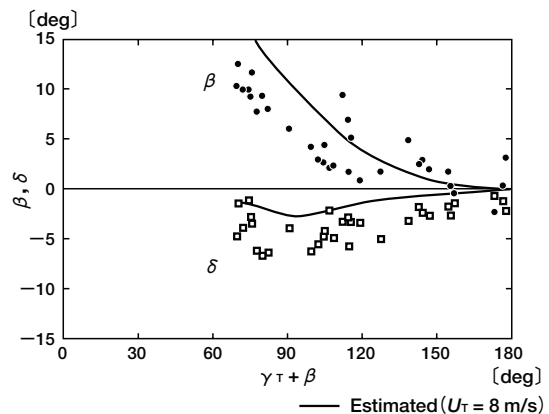


図3 斜航角度と当て舵角度

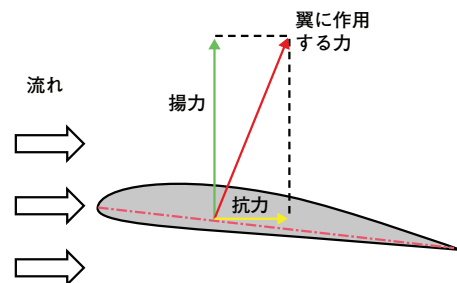


図4 翼に働く揚力と抗力

でも3度程度の斜航角は時々みられる。

これは図4のように、帆が航空機の翼のメカニズムと同じ揚力を利用して示す。船舶の最新の風力利用の基礎的なメカニズムは航空機の翼と同じである。風の流れに対して翼(帆)に少し角度をもたせると、風の流れに垂直に揚力(帆は推力)が生じる。風向きと帆の角度を示したものが図5の菱垣廻船の帆走原理である。これは現在の帆等によるアシストでも同様の原理である。

とりわけ真横風は、エンジン船では斜航や当舵が生じ燃費悪化の要因となるが、帆を使えば前進力に転化できる。一方、追い風は自身のスピード

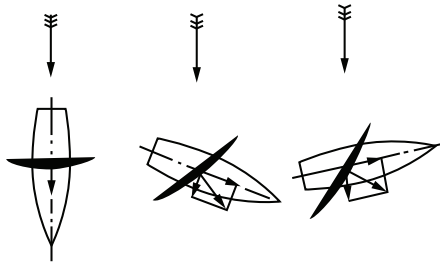


図5 追い風帆走と開き走り

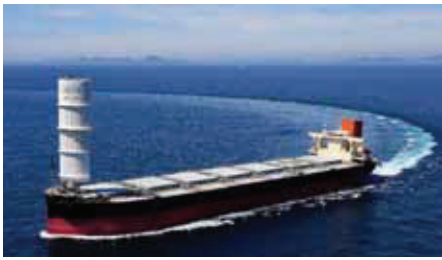


図6 伸縮式の帆を搭載した10万トンバルカー(松風丸)

で相対的に風速が弱まるため、一般的に考えられているほど効かないし、あまりアシストにならない⁽²⁾。

3 最近の帆(セイル)による風力利用

3.1 硬翼帆(ハードセイル)

従来の帆船で用いられた布による軟翼帆は、紀元前から用いられてきたように、製造が容易で強風時の縮帆も可能であった。ただ、風によって形状が変化するので、帆の正圧側と負圧側の圧力に変動が生じ、安定的に高推力を得るに難点があった。また、帆の上げ下げと角度変更は多数の船員が必要になった。菱垣廻船で帆と帆桁の重量は1.7トンで、帆の担当は左右6名ずつ合計12名必要になった。

日本で研究された硬翼帆は、東京大学が中心となり産学連携で進めた次世代帆走船ウインドチャレンジャー・プロジェクトがあり、昨年末に商船三井が1本の伸縮式硬翼帆を搭載した10万トン積載のバルカーを就航させた(図6)。帆走の力学は菱垣廻船とほとんど同じだが、帆の材質が布からCFRPとなり翼の形が変化しないので性能が向上している。

また、硬翼帆では布一枚ではなく厚みをもった形状で、正圧側も翼形状を形成してより推力を得ることができている。風は右と左から来るので、前後(左右)対称の翼形を採用して、左舷か



図7 ワレニウスが開発するGHG 90%削減船

らの風は帆の左を翼の先端に、右舷からの風では帆の右を先端にする。その結果、正面を除き風向約30度から真後ろまで、帆による推力が得られる性能となっている⁽³⁾。

帆の運用方法は4段の伸縮式で、正面の風は完全縮帆して帆を風に立て抵抗を減らす。その他の角度は推力が得られるように角度調整を行う。縮帆と展帆も風向風速とマスト基部の応力、風向風速などを計測して自動で行う。

さらには、天候予測に基づき最大推力を得て、かつ最速で到着できる風を得る航路を選択できるシステムも搭載している。現在就航時の利得を計測中だが、オーストラリアから日本までの南北航路(風の弱い地域)の処女航海で約5%の馬力削減効果が出ている。

欧州船社のワレニウス・ウイヘルムセンがEUの補助金約9Mユーロを得て開発する帆走自動車船が図7で、10kt(約18km/時)のときに航海平均90%のGHG削減が可能としている。WWがプロジェクトのコーディネータを務め、スウェーデンの船舶設計・船舶管理会社ワレニウス・マリン、アルファラバルとワレニウスが折半出資し風力推進船の技術開発を手掛けるアルファ・ワル、自動車メーカーのボルボ、気象予想サービスを提供するストームジオ、ノルウェー船級協会(DNV)などが参画している⁽³⁾。

3.2 軟翼帆(ソフトセイル)

ソフトセイルも改良が加えられている。図8はDKSTRA N.A.社の全長106mの大型ヨットで2018年に就航している⁽³⁾。

軟帆であるが、翼形状のフレームに沿って展張されるので硬翼帆に近い性能が出て、最高速度は17kt(約32km/時)である。この船は客船なので積載量は少なく、船底はシャープな船型と思われる。約150年前のティクリッパーのカティー



図8 DKSTRA N.A. 社の全長 106 m の大型ヨット



図9 5本の起倒式(横に)ロータセイルを装備した超大型バルカー

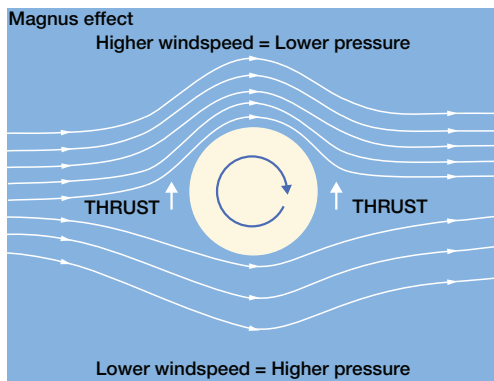


図10 ロータセイルの原理

サーク号(約600トンの貨物積載量, 全長86m, 最速20kt)も同様にシャープな船型であった。

3.3 ロータセイル

デッキ上に円筒型のロータを垂直に搭載し, 円筒が風を受けてマグナス効果で推進力を得る円筒型帆も普及しつつある(図9)。野球のボールが回転によってカーブする原理と同一である(図10)⁽³⁾。

風速に対してロータ表面の速度が約2~3倍になるようロータを回転制御して, 抗力を抑えつつ推力を最大に利用するようコントロールしている。図11の単位面積当たりの揚力係数は一般の帆の数倍になる。

フィンランドのNorsepower社, イギリスのANEMOI社他の円筒型帆が, フェリーやRORO

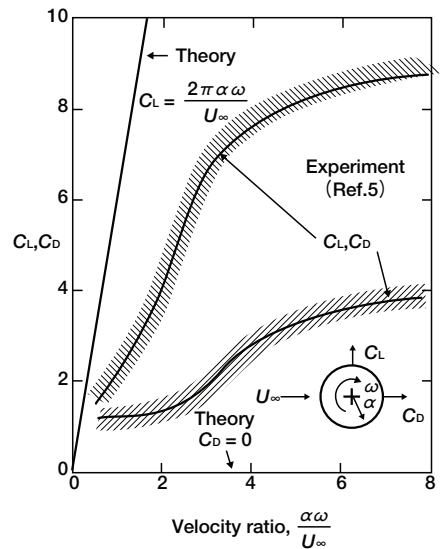


図11 ロータセイルの揚力係数と抗力係数

船, プロダクト船, 大型バルカー(鉄原船)などに搭載されており, 2023年1月時点で14隻, 26本のロータセイルが搭載されている。中国では円筒帆を搭載したVLCC(超大型タンカー)が竣工し, 韓国造船大手もVLCCへの搭載をオプションとして用意している。

マースク(最大級の海運会社)は10万トンのタンカーに2本のロータセイルを就航船に搭載した。1年間の就航解析を行い, 年平均で約8%の省エネ効果が報告されている。

ロータセイルは優れた帆走性能を有し, 正面から左右の25度以外は推力を得られる。24m高さ4m直径のロータセイルで, 20m/sの斜め後方の風を受ければ, 2,000kW相当の推力が得られる(1本で図9の様な大型バルカーの主機馬力の約1割の馬力相当)。外部の回転筒はCFRP/GFRPの積層構造で軽量化が図られている。

3.4 サクシオンウイング

現在の帆は大なり小なり翼の原理を使っている。翼の背面は表面の流れが高速になり, 翼の後端で流れが乱れ剥離することがある。航空機では失速といい, 揚力が低下して危険な状態になる。

これを防ぐため, 翼の負圧面の後端で吸い込み口を設ける工夫がなされている(図12)。翼をコンパクトにするメリットがある。図13はオランダのEconowind社の2本のサクシオンウイングユニットを船首に取り付けた例である⁽³⁾。

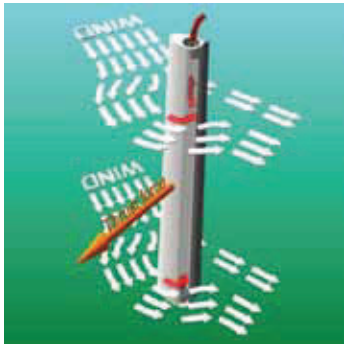


図12 サクションウイングの原理



図13 サクションウイングを装備した貨物船



図14 Airseas社のカイト

4 カイト (Seawing)

風の活用も検討が進んでいる。Airbus社の傘下のAirseas社が実船実験を進めている。

川崎汽船が大型バルカーへの搭載を決め検討を進め、本年初めに就航船に搭載して計測を始めている(図14)⁽³⁾。

風は高度が増すに従い風速が早くなるので、高々度の風を受けることで、20%以上のGHG(使用馬力)削減がもたらされるとのこと。また、カイト型は運航中の展開や回収も課題になるが、展開と回収は船首のマストを使い自動で行う。カイトは1,000 m²の大型で200 mの高々度の強い風を捉える。8の字旋回を行い、高速で移動することで翼として働き推力を得る。風から複数の索が



図15 ウインドアシスト船型の圧力分布図(30度斜め向かい風)

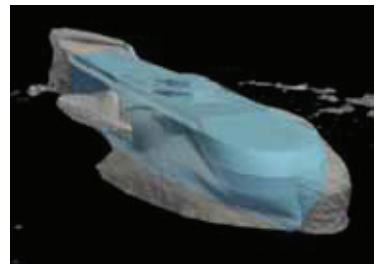


図16 最新の自動車船の圧力分布図(30度斜め向かい風)

出ており、索の付け根のフライトコントロールポッドで風をコントロールする。他の帆と同様、前方からの±40度を除いた280度からの風は前進推力として利用可能。

5 船体形状で推進力を出す試み

自動車では空気抵抗は減らすべきものであって、利用するという発想はないのではと思料するが、船体形状で推進力を出す船型を商船三井と三井造船昭島研究所と商船三井テクノトレードで図15のように開発している(最新の自動車船は図16)⁽⁴⁾。

船体水上部分に斜向風が来たときに船体を翼として揚力(主に前縁推力)が発生する原理を利用し、推力を最大化する最適な形状を考案した。この形状で外洋航海するシミュレーションを行うと、平均で5~6%の馬力アシストが得られる。この形状は自動車船だけでなくフェリーや客船などにも採用可能で、外形を整えるだけで効果が得られる費用対効果の優れた船型である。

図17の横軸は相対風向(自船の船速があるので真風向は相対風速よりやや後ろからになる)、縦軸は正面風圧抵抗係数で、最下段の最も抵抗の小さいグリーンの線がウインドアシスト船型(図15)で最上部の黒線が最新の自動車船(図16)である。ウインドアシスト船型は正面抵抗も小さいが、風の角度がつくに従い抵抗が小さくなり、約35度のときに空気抵抗がゼロとなる。さら

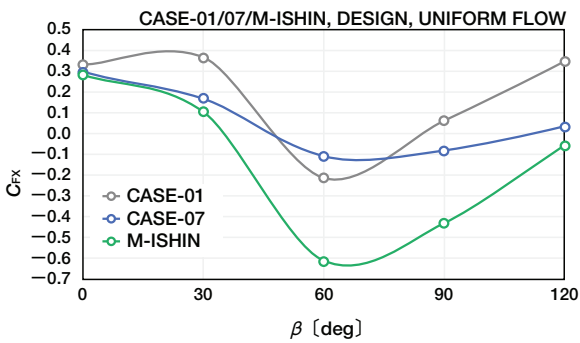


図17 相対風向と前面抵抗係数 C_{rx} (マイナスは推力を表す)

に、60度の斜め向かい風の際に、向かい風の正面抵抗の約2倍の推力が出る。17 ktで航海中17 m/sの横風があれば、プロペラ推力の約12%の推力が発生する。どんな強風時も縮帆する必要のないロバストな船型である。

現在、船型の船首部のみ適用のフェリーが建造中のほか、次の計画の自動車船への実船採用も検討が進んでいる。さらに船型の改良(効果の増大)も進んでいて近日発表できると考えている⁽⁵⁾。

6 おわりに

本稿では、船舶の最近の風力利用の動向について紹介した。このバックグラウンドは、先に述べたように石油というエネルギー密度の高い化石燃料を世界中で自由に使い、地球温暖化をもたらしてしまった。その後悔から、サステナブルな輸送を追求するフェーズに入っているためである。

GHG削減が待ったなしなので、船業界でも真剣に取り組んだしたところと感じている。

世界はすでに産業革命前より1.1°C温暖化しているため、世界の排出量を現在のレベルから削減できなければ、2030年までに1.5°C目標に対する残余カーボンバジェット(排出してもよいと許容される炭素予算)を使い果たしてしまうとされている。2022年末時点で世界全体のGHG(温室効果ガス)は約1%の増加と推定されており、この

ままでは今世紀末には2.5度の温度上昇をもたらされるとされている。これは現在より世界平均で1.4度の温度上昇を意味する。

船舶は巨大な構造物なので、動かすのに大きな力を必要とする。そのため自然エネルギーの中でも太陽エネルギーが集積した結果の風が有望である。ちなみに、現在のバルカーやタンカーは鋼船になったことで、木造船より強度が格段に増して大型化が進んだ。積載量(8万トンから30万トン)が木造帆船と2桁以上異なるので、木造帆船より格段に大きな推進エネルギーが必要となっている。

風力利用は風力を電気などに変換せずに、推力として直接利用するため効率は高くなる。風を補助動力として利用することで、気象予報でいい風をつかみ、現在の制御技術を活用すれば、最大限に効率を高めることができる。

現在の運航船でのロスを削減し、さらに減速運航も深度化すれば、船本来の特質である小さなエネルギーで運航ができるようになっていくものと考えている。そこに自然エネルギー利用も加えることで、さらにGHG削減の道を広げることができる。現在の運航船が使っている半分のエネルギーで貨物輸送しなければならないし、できるものと考えている。

そこから、水素やアンモニアなどの代替燃料の投入で究極のGHGフリーの船舶を早く市場に投入して、地球温暖化のスピードを落とさなければならないと考えている。

フェイス



田中良和

参考文献

- (1) 野本健作, 増山豊, 桜井晃: 浪華丸の帆走実験と性能。「菱垣廻船を通してみる難波の昨日・今日・明日」シンポジウムテキスト(2000)
- (2) 田中良和: 風力利用への取り組み1&2, 月刊共有船6, 7月号(2020)
- (3) 商船三井HP, ワレニウス・ウイヘルムセン社HP, Norsepower社HP, DKSTRANA社HP, Econowind社HP, 川崎汽船HP
- (4) 田中良和ほか: 風圧抵抗低減船型に関する検討, 日本船舶海洋工学会論文集, 第14号(2012)
- (5) 田中良和: 商船における風圧抵抗削減・風力推進利用の取り組みの紹介, 日本船舶海洋工学会月刊誌KANRIN, 3月号(2023)