2 流体分野のGHG削減

- 今後の対応と技術-

流体設計系 \* 辻本 勝

## 1. はじめに

国際海運からの温室効果ガス (GHG; Greenhouse Gas) の排 出削減のため,国際海事機関(IMO; International Maritime Organization)により,2013 年から第一段階の規制である 1)新 造船に対するエネルギー効率設計指標(EEDI; Energy Efficiency Design Index)規制,2)船舶エネルギー効率管理計 画書(SEEMP; Ship Energy Efficiency Management Plan)の保 持義務が開始された.また,2019年からは燃費報告制度(DCS; Data Collection System)も開始される.これによりエネルギー 効率の高い船舶の市場への導入,エネルギー効率の高い運 航・船舶管理が求められ,研究開発が行われている.

一方,2015年の第21回気候変動枠組条約締約国会議 (COP21)にて採択されたパリ協定では,産業革命前からの 世界の平均気温上昇を2度未満に抑え,平均気温上昇の1.5 度未満を目指すことを共通の目標とした.その実現のために は,国連気候変動に関する政府間パネル(IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change)でとりまとめた第 5次報告書<sup>1)</sup>での低位安定化シナリオ(RCP2.6)(代表的濃 度経路: Representative Concentration Pathways)を選択する必 要がある(図-1).このシナリオは2050年までにGHG 排出 量を半減させ,今世紀中にGHG 排出量をほぼ0にするもの である(図-2).



図-1 地球全体での平均気温の変化と将来予測(IPCC)<sup>1)</sup> (RCP8.5:高位参照シナリオ, RCP2.6:低位安定化シナリオ)



2. IMOのGHG 削減戦略

2018年に IMO にて、国際海運の GHG 排出削減目標やその実現のための対策等を包括的に定める GHG 削減戦略<sup>2)</sup>が 採択された.多数の提案がある中、日本案<sup>3)</sup>(図-3)を中心 に、最終的に合意されたもので、2008年当時に対し、2030年 までに国際海運の単位輸送当たりの CO<sub>2</sub>排出量を40%改善, 2050年までに70%改善(努力)する、2050年までに国際海 運全体の年間 GHG 排出量を50%削減し、今世紀中可能な限 り早期にゼロ排出(努力)とするものである.この極めて高 い目標設定により、目標達成のためには、高度な技術力によ る解決が求められることとなった.

当所でも IMO GHG 削減戦略実現のための長期ビジョン<sup>4)</sup> を策定し,流体分野でも分野連携とともに解決への取り組み を進める.



図-3 GHG 排出削減の中長期目標(日本提案)<sup>3)</sup>

#### 3. 流体分野での GHG 削減

IMO の GHG 削減戦略が定める目標値はこれまでの EEDI 規制での削減値に比べて極めて高く,従来の延長技術では達 成が不可能なレベルである.少なくとも代替燃料の利用が前 提となるが,今後の GHG 削減のためには,将来を見据えた 意識・技術の転換が必要である.

EEDI 規制は建造時の平水中性能を示す、いわばカタログ 指標に対するものであるが、今後は実燃費の削減への転換が 必要で、実海域性能の良い船舶が求められ、既存船でも GHG 排出を削減できる手段・手法が求められる.

以下に流体分野としてこれから取り組みが必要な事項に ついて記載する.

#### 3.1 船型の肥大化

カルマン・ガブリエリ線図と呼ばれる図-4 は各種交通機関の比出力(P/(WV))と速力(V)との関係を示したものである. ここで, P は動力, W はペイロードである.比出力はエネル ギー効率と同等のパラメータであり,縦軸が小さいほどエネ ルギー効率は高い.

今後の GHG 削減対策は代替燃料の利用が前提となる. その場合,燃料タンク容積が数倍程度増加し,従来船型では貨物積載量(W)が減少し,エネルギー効率は悪化する. 一方,図-4からも分かるとおり,貨物積載量を維持または増加させ,エネルギー効率を向上させるため,全船種を対象に船型の肥大化のオプションが検討される.



図-4 各種交通機関の比出力 (*P*/(*WV*)) と速力(*V*)との関係<sup>5)</sup> (横軸に平行な矢印の長さは同一体積の没水球体の最小抵抗とのずれ)

#### 3.2 低速化と耐航性能

エネルギー効率の向上のためには低速化のオプションも 検討される.船型の肥大化には低速化も伴うため、タンカー やバルカー等の超低速肥大船の技術的成立性の検討が必要 である.超低速肥大船に対応した配置変更,船型・省エネ付 加物・高効率プロペラの開発が必要であるが,低速化に伴い 燃料タンク容積の増加も抑えられる.また,輸送時間の長時 間化に伴い,最終消費者の意識転換,社会合意も必要となる ことも忘れてはならない.

一方,船舶の低速化に伴い,主機も低出力化するためシーマージンを正しく評価し,設定しないと実海域中で走らない船となる.そのためには耐航性能,波浪中抵抗増加の評価も重要である.図-5,図-6はEUプロジェクトSHOPERAで実施されたDTC船型(メガコンテナ船型)の水槽試験及びベン

チマーク計算結果(図中の各線)<sup>6,7)</sup>に流力性能・機関特性を 考慮したシミュレーションツールである実運航性能シミュ レータ VESTA<sup>8)</sup>の計算結果をプロットしたものである.



図-5 波浪中抵抗増加の周波数応答(DTC 船型, 向波短波長) (上:0knot, 中:6knot, 下:16knot)



図-6 波浪中抵抗増加の周波数応答(DTC 船型, 6knot, 向波)



図-7 荒天 (BF8) での主機出力と舵面積の評価 (左上:主機回転数,右上:船速,左下:斜航角,右下:舵角)<sup>8)</sup>



図-8 荒天(BF9)での主機出力と舵面積の評価(左上:主機回転数,右上:船速,左下:斜航角,右下:舵角)<sup>8)</sup>

低速での水槽試験は難しいが、VESTA は水槽試験結果と も整合していることが分かる.

また,荒天下での操船性の確保も必要で,実海域での安全 性を担保し,総合性能として実海域性能を向上させた船舶の 設計が求められる.図-7,図-8 はパナマックスバルクキャリ アを対象に,VESTA を使用して荒天下での性能を評価した ものである<sup>8)</sup>.海象はビューフォート風力階級 8 (BF8:平均 風速 19.0m/s,有義波高 5.5m)及びビューフォート風力階級 9 (BF9:平均風速 22.6m/s,有義波高 7.0m),平均波周期 10s, 風向と波向は同じ向きとして,主機回転数,船速,斜航角, 舵角を計算したものである.

主機の連続最大出力 (MCR) を 80%,70%に絞った場合について評価すると,BF8 では速力に差は出るが操船不能な状況は生じていない.BF9 では横波横風(70-100度)では最大舵角としても釣り合いが保てず,操船不能なこと,向波向風では主機トルクリミットにより,4knot程度まで船速が下がること,舵面積(AR)を1.5倍とした場合を大きくした場合は操船範囲が広がることが分かる.

このような超低速肥大船の研究開発では確認手段として 水槽試験が必要になるが、従来の水槽試験での試験評価で は、低速では計測される抵抗値・スラスト値等が小さく、精 度確保が困難となる.また、側壁反射の影響を受けるため、 施設の関係で模型船サイズ・試験速度の制約も生じる.この ため、今後は従来の力の計測だけではなく流場計測とこれら と数値計算技術を融合させた新たな水槽試験技術・施設が必 要となる.

### 3.3 自然エネルギーの利用

最終的な目標である GHG 排出ゼロを達成するためには自 然エネルギーの利用は重要な技術要素である.

例えば、Compagnie de transport maritime à la voile (CTMV)
社 (2008-2010 年) や、Transport à la voile (TOWT) 社(2009 年
-)のように、帆船で貨物輸送を行い、GHG 排出量をほぼ 0 とする取り組みが行われている。

海運からの GHG 削減の実現を支援するため,地球環境フ アシリティ (GEF; Global Environment Facility)-国際連合開発 計画 (UNDP; United Nations Development Programme)-国際海 事機関 (IMO; International Maritime Organization)プロジェク トの GloMEEP(Global maritime energy efficiency partnerships)に て技術対策の現状分析が行われている<sup>9</sup>.



図-9 GloMEEP による GHG 削減技術の分類<sup>9)</sup>

そこでは対象を機器・機関,推進・船体改善,エネルギー 消費源,エネルギー回収,運航改善に類別し(図-9),それ ぞれの内容と技術成熟度,適用範囲を調査し,表にまとめて いる.

GloMEEP の類別では自然エネルギーの利用(エネルギー回 収)は、帆装船、ローター船、索引凧システム、太陽光が上 げられており、すべて未成熟とされている.

1924年にドイツで開発・建造されたローター船や,1970年 代に日本舶用機器開発協会で開発した硬帆と主機を備えた 帆装貨物船の実現にはじまり,2007年にドイツで牽引凧シス テムが開発され,それを装備した船舶(図-10)<sup>10</sup>,ローター 船のクルーズフェリーへのレトロフィット(図-11)<sup>11</sup>,中国 での帆装 VLCCの建造(図-12)<sup>12</sup>と実現されている.また, 我が国でも2009年から東京大学 JIP(Joint Industry Project) にてウィンドチャレンジャー計画が行われ<sup>13</sup>,実現を目指し 研究開発が進められている(図-13).



図-10 牽引凧システムを装備した一般貨物船<sup>7)</sup>



図-11 ローターの設置例<sup>®</sup> Viking Grace(2018 年 4 月レトロフィット)



図-12 帆装 VLCC<sup>9)</sup> New Vitality (2018 年 11 月就航)



図-13 ウィンドチャレンジャー第1船計画(バルクキャリア)<sup>10)</sup>



図-14 次世代帆装船 (バルクキャリア)<sup>14)</sup>





2003年に実施した次世代帆装船の研究開発では、ギア付き バルクキャリアに帆を装備するというコンセプト(図-14)で 帆の開発,ウェザールーティングシステムの開発等の研究開 発が行われた<sup>14)</sup>. 帆装船はどのような風速・風向でも帆の効 果が生じるわけではなく,向風や強風の場合は縮帆が必要 で,縮帆状態エネルギーロスも生じる.図-15に示す風速・風 向と船速の関係で特性カーブが段になって変化しているの は縮帆により生じるものである.

### 3.4 運航最適化

実運航性能の向上のためには、気象海象情報を利用したウ ェザールーティングサービスが利用されているが、一層高度 な情報提供による運航の最適化が求められている.



図-16 高度ウェザールーティングの実船検証<sup>15)</sup>

図-16 は 2015-2017 年度にかけて実施された,波浪レーダ ーを利用し, VESTA を組み込んだ高度ウェザールーティン グシステムの開発と実船検証の様子である.自動車運搬船に ついて,本システムでのウェザールーティングを実施し,従 来モデルと比べて約 5%の燃費削減効果があること,荒天時 の到着遅延リスクの低減にも効果があることを示した<sup>15)</sup>.

今後高まるであろう自然エネルギーの利用には高度ウェ ザールーティングは不可欠である.帆装船では縮帆時間を小 さくし効果を最大とする航路,船速を求めるためには高精度 な性能推定が必要となる.

#### 4. 当所の取り組み

GHG の排出削減を進め,実海域で真に性能の良い船を実現し,運航するために,2018 年度は以下の基盤的な取り組みを行った.

(1) 実海域性能の検討,評価や海象リスクの評価のために は海洋情報を把握する必要があるため,一般での利用を 目的に10年分の波浪推算データを統計解析し,10度格子 海域毎に表示される全球版波と風の統計データベース (GLOBUS)を開発しHPで公開した(図-17)<sup>16</sup>.世界で 初めて全球での波高-波周期-風速を含む3 相関表が利 用可能となるなど,高度な利用が可能である.



図-17 全球の波と風の統計データベース (GLOBUS)<sup>16)</sup>

(2) 海上試運転での公正な実施を促進するため,海上試運 転(速力試験)における波浪中抵抗増加の算定手法である NMRI 法をプログラム化(VESTA-ST)し, Microsoft 社 Excel で動作する形式で国内外に公開した<sup>17)</sup>. VESTA-ST により,海上試運転での波浪修正をあらゆる波向で実施 することが可能となり,本船性能の把握・評価に必要とな る平水中速力を,従来よりも合理的に精度良く算定する ことを可能とした.



図-18 海上試運転での波浪修正プログラム(VESTA-ST)<sup>17)</sup>

# 5. まとめ

国際海事機関での GHG 削減戦略をうけ,流体分野で取り 組む中心的な内容を示した.

今後は船舶の肥大化,低速化が進み,自然エネルギーの推 進への利用,運航の高度最適化が進むと考えられ,それには 高度な技術力が必須である.また,それらの実施を支える従 来技術の延長ではない新たな取り組み,施設,装置が必要と なる.

高い目標を達成するためにはオープンイノベーションの 活用など、幅広い分野で研究開発体勢を組めるかが重要とな ろう.

## 参考文献

- Intergovernmental Panel on Climate Change, Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis (2014).
- Resolution MEPC.304(72): Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, International Maritime Organization (2018).
- Analysis of GHG emissions reduction targets for international shipping, Reduction of GHG Emissions from Ships, MEPC72/7/3, submitted by Japan (2018).

- 4) 平田 宏一:低・脱炭素燃料に対応する舶用動力システム に関する研究,第 19 回海上技術安全研究所研究発表会 (2019).
- 5) 赤木 新介: 新交通機関論-社会的要請とテクノロジー-, コロナ社 (1995), pp.48-88.
- V. Shigunov: Discussion of Results: Drift Forces and Added resistance [and Steering Forces], Proceedings of ITTC-SHOPERA Benchmarking Workshop (2016).
- 7) F. Sprenger, A. Maron, G. Delefortrie, T. van Zwijnsvoorde, A. Cura-Hochbaum, A. Lengwinat and A. Papanikolaou: Experimental Studies on Seakeeping and Maneuverability of Ships in Adverse Weather Conditions, Journal of Ship Research, Vol. 61, No. 3 (2017), pp.131-152.
- M. Tsujimoto, N. Sogihara, M. Kuroda and A. Sakurada: Development of a Ship Performance Simulator in Actual Seas, Proceedings of 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2015), OMAE2015-41708 (2015).
- 9) https://glomeep.imo.org/
- Wind power as economical alternative, Special GreenTech, Ship & Offshore, Edition 2011 (2011), p.34.
- Wind propulsion gathers momentum as installations prove successful, The Naval Architect, Jun. (2018), pp.24-27.
- 12) Delivery of the world's first VLCC with 'windsurfing' installation, The Naval Architect, Feb. (2019), p.24.
- 13) ウィンドチャレンジャー計画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 (2017).
- 14) 辻本 勝, 上野 道雄, 藤田 裕, 廣岡 秀昭: 次世代型帆装 船用ウェザールーティングシステムの開発とその評価, 関西造船協会論文集, 第 242 号 (2004), pp.25-36.
- 15) M. Tsujimoto, T. Matsuzawa, N. Sogihara, K. Hirayama, Y. Sugimoto, K. Hasegawa and K. Yokokawa: Advanced Weather Routing System for Ships in Actual Seas -Development and Validation by a Ship-, Proceedings of the 16th IAIN World Congress 2018, International Association of Institutes of Navigation (2018), pp.322-331.
- 16) https://www.nmri.go.jp/study/Intellectual/globus/namikaze\_ main.html
- 17) https://www.nmri.go.jp/study/research\_organization/fluid/vesta /st-appli.html