

# タグボートにおけるハイブリッド推進システムの燃料節減効果に関する研究

◎西尾尚晃(東京海洋大学) 木船弘康(東京海洋大学)

## 1. はじめに

本研究の対象であるハーバータグボートは、大型船の出入港補助を主な業務とするため、船体サイズと比較して高出力の主機を搭載している。ある入港作業におけるタグボートの主機負荷率ごとの積算時間をまとめたものが図1である。これより主機が定格出力付近で運転される時間は極めて短く、低負荷運転が長いことが明らかである。この特徴に注目して、低負荷運転時の効率を改善するために大容量電池を用いたハイブリッド方式のタグボートの開発が進められている<sup>(1)(5)</sup>。しかし、大容量電池を利用するため建造費が高価になる傾向がある。そこで筆者らは、大容量電池を用いないハイブリッド方式のシステムを提案した<sup>(6)</sup>。

前論文までにおいて筆者らは、推進軸に設けられている湿式多板クラッチ(以下、クラッチとする。)の効率は一定であると仮定した<sup>(7)(11)</sup>。しかし、タグボートはクラッチを滑らせることで低出力域における細やかな出力調整を実現しており、その動力伝達効率はスリップ率により変化するものと考えられる。そこでハイブリッドタグボートの燃料消費特性を詳細に理解するため、クラッチにおけるスリップを加味したシミュレーション用モデルの改善を行った。またこの改善検討を通じて、先に提案した推進システム(以下、前提案型システム)では、運用上の問題が生じることが明らかとなった。そこでこの問題を改善するために新たな推進システム(以下、新提案型システム)を提案した。本論文では前提案型システムにおける運用上の問題点と対策を述べている。そして燃料消費シミュレーションを行うことで、前提案型システムと新提案型システムにおける燃料消費特性を算出し、その比較・評価を行った。

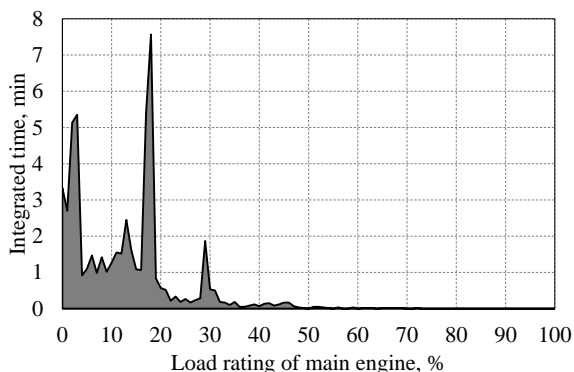


図1 あるタグボートにおける主機負荷率の実測例

## 2. 推進システム

### 2.1 現行型システム

図2は国内における一般的なタグボートのシステム図を示しており、数値は平均的な機器定格を表している。主機(M/E-1,2)はクラッチ(C-1,2)を介して旋回式プロペラ(ATD-1,2)を駆動し、発電機(D/G-1)の電力は船内負荷(Load)へ供給される。本論文では、この推進システムを現行型システムと称する。

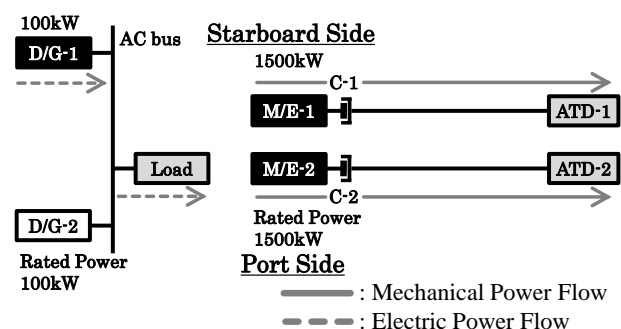


図2 日本国内における現行型タグボートのシステム

### 2.2 前提案型システム

前提案型システムは、現行型システムで独立していた主機系統と発電機系統をモータジェネレータ(M/G-1,2)、電力変換器(PC-1,2,3)を用いて接続している(図3)。

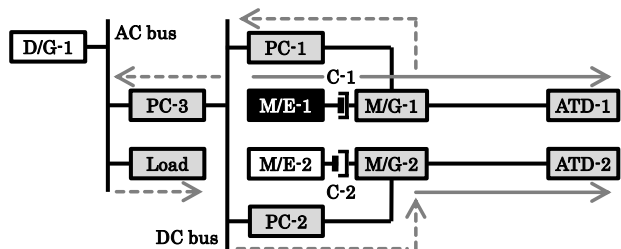


図3 前提案型システムとエネルギーフロー例

このシステムではモータジェネレータに電力を供給することで、軸出力を得ることができる。そのため発電機の定格が大きければ、主機出力をアシストすることができ、またモータのみでプロペラを駆動することも可能である。それに加えて、電力変換器は双方向電力変換が可能であるため、モータジェネレータを軸発電機として利用することができる。これにより図3に示すエネルギーフローのように反対舷のモータと船内負荷へ電力を給電することで、主機1台のみによる運用が可能となる。

### 2.3 前提案型システムの問題点と解決策

前提案型システム(図3)で右舷主機(M/E-1)のみを運転した場合の出力特性と負荷特性に関する課題について述べる。図4はプロペラ(ATD)1基を駆動する際の負荷特性曲線(実線)と、M/E-1の出力可能範囲(点線枠)のイメージである。この範囲内であればATD-1を駆動することが可能である。

前提案型システムにおいて、M/E-1はATD-1を駆動すると同時に、船内負荷(Load)及びM/G-2へ電力を供給するためにM/G-1を軸発電機として駆動する。この時の負荷特性曲線を破線で示す。ここでは各舷の推進出力は同一であるという条件のもと議論を進める。プロペラ1基に加えて軸発電機を駆動するため、負荷特性が大幅に変化する。この負荷特性は、M/E-1の出力可能範囲外であるため運用することができない。この問題を解決するにあたり、切り替え可能な減速ギヤを用いることとした。これによりM/E-1のみで両舷のプロペラ負荷及び船内負荷を担う場合、その負荷特性に合わせてM/E-1が出力できるよう減速ギヤを用いる。減速ギヤを用いた場合の出力可能範囲を一点鎖線枠で示す。前提案型システムにおいてM/E-1のみで運用する場合には、この減速ギヤを利用する。しかし、主機を2台運転する場合や純電気推進モードでは、この減速ギヤを用いる必要はない。この際には、ギヤ比を1:1へ切り替えて利用する。

なお、提案型システムのモータジェネレータは永久磁石型同期機である。この永久磁石型同期機の端子間電圧は軸回転数の関数で表される。

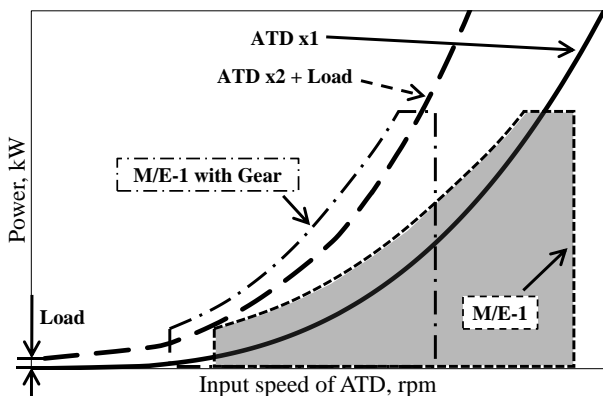


図4 M/E-1の出力特性と負荷特性のイメージ

そのため減速ギヤをM/G-1へ設置した場合、軸回転数が減速されるため端子間電圧が低下してしまう。これはPC-1の電力変換効率の悪化につながる。これを考慮した上で、切り替え可能な減速ギヤ(GEAR)をM/G-1とATD-1の間に設置した(図5)。

次にクラッチの設置位置に関する課題について述べる。前提案型システムでは、モータジェネレータとプロペラの間クラッチが設置されていない。そのためM/G-1を軸発電機として運用する際には、発電電力の大きさに応じてATD-1が遊転してしまう。このため待機中のように推進力ゼロでドラフトする場合には、ATD-1が発生させた水流をATD-2の水流で相殺しなければならない。すなわち、余分なエネルギーを消費することになる。この問題を解決するために本論文ではクラッチの位置をモータジェネレータとプロペラの間に移動した。これにより、M/G-1による発電電力とATD-1への推進動力を別々に制御することが可能となる。これに加えて、滑り損失無く常に機関最低回転数以上で軸発電機を駆動することが可能となる。またM/G-1による発電電力でM/G-2を駆動する場合(電気推進モード)停止中のM/E-2へ動力が伝達されないようにするため、M/EとM/Gの間に乾式クラッチ(C-3,4)を設置する(図6)。このシステムを本論文では新提案型システムとする。

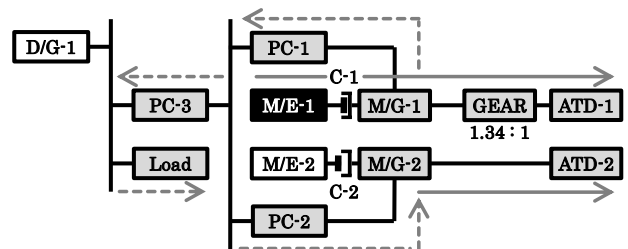


図5 前提案型システムにおけるエネルギーフロー

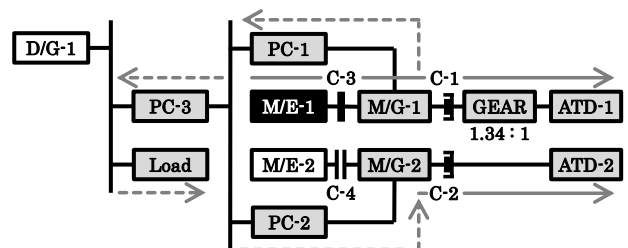


図6 新提案型システムにおけるエネルギーフロー

この新提案型システムでは、右舷主機のみによる運用やすべての主機を停止させた発電機のみによる純電気推進のような運用など様々な運用が可能である。

以上のシステム改善がどれだけ燃料消費特性に影響するのかを明らかにするため、燃料消費モデルを利用して新提案型システムと前提案型システムの比較検討を行った。この際、クラッチ効率による影響を加味するために燃料消費モデルの改善を行った。

### 3. 各機器の効率モデル

本研究で構築した推進システムの燃料消費モデルには、システムを構成する機器の熱効率及び動力変換効率を推定するための数式モデルが組み込まれている。これらは複数の船舶の完成図書から実際のデータを引用することで作成した。電力変換器の効率に関しては、様々な条件においてパワーエレクトロニクスシミュレーションを行い、効率推定マップを作成した。C-1及びC-2のクラッチ効率は、タグボートに利用されているクラッチデータをもとに、スリップ率と効率の関係を数式化した。本論文では機関回転数400rpmを最低回転数と設定し、機関回転数が400rpm以上ではクラッチが嵌合するものとしている。この燃料消費モデルを利用することで、燃料消費特性の面から2つの提案型システムの比較検討を行った。

### 4. タグボートの燃料消費モデル

#### 導出のための条件

先述の燃料消費モデルは推進システムを構成する各機器の定格出力を設定することで決定される。過去5年の間に国内で竣工したタグボートの内、総合定格出力(両舷の合計出力)が3000kW前後のタグボートは全体の70%を占めている<sup>(12)</sup>。このことから本論文では、現行型システム及び提案型システムでの各機器の定格を表1、表2のように設定した。

表1 現行型システムにおける各機器の定格出力

Item	Symbol	Rating	Number
Main Engine	M/E-1,2	1,500kW	2 equipped
Diesel Generator	D/G-1,2	100kW	2 equipped

表2 提案型システムにおける各機器の定格出力

Item	Symbol	Rating	Number
Main Engine	M/E-1,2	1,350kW	2 equipped
Diesel Generator	D/G-1	300kW	1 equipped
Motor Generator	M/G-1,2	860kVA	2 equipped
Electric Power Converter	PC-1,2	220kVA	4 blocks
	PC-3	170kVA	2 blocks

### 5. 提案型システムにおける燃料消費特性

2つの提案型システムの燃料消費モデルが持つ特性を評価する上で、現行型システムにおける燃料消費モデルの特性を基準として把握する必要がある。これらの特性を算出する上での共通条件として、①各舷の要求推進力が等しいと仮定する。②船内負荷は要求推進力にかかわらず一定値(30kW)とした。なお、現行型システムにおいては、常時2台の主機(M/E-1,2)と1台の発電機(D/G-1)が運転しているものとして計算を行った(図2)。

提案型システムでは様々な運用方法が考えられるが、本論文では、一例として右舷主機(M/E-1)のみを運転している場合について紹介する。この運用状況では、推進力と船内負荷を主機1台の出力で賄っているため(図5,6)、両舷の合計出力は最大で1350kW未満となる。したがって港内待機中や港内移動などの高出力が要求されない状況下で利用できるモードである。

この運用における燃料消費モデルの特性を算出した結果が図7である。現行型システムにおける燃料消費モデルの特性を基準値としている。縦軸は、提案型システムにおける燃料消費増減量を示し、横軸は両舷の合計推進出力を示している。

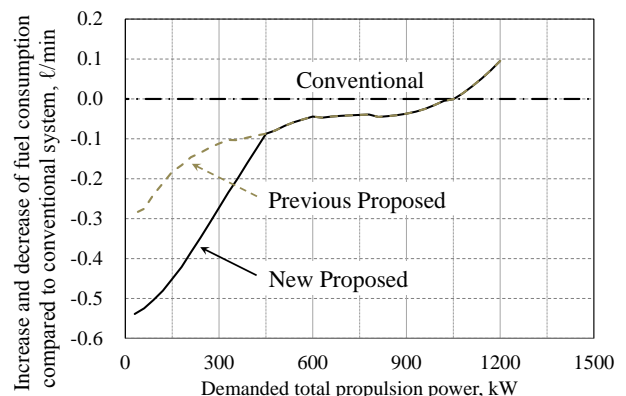


図7 提案型システムにおける燃料消費特性

## 6. 考察

前提案型システムによる主機1台の運用では、両舷の推進力を主機1台で賄うため、現行型システムと比較して主機負荷率を高くすることができる。また主機のサイズダウンによる負荷率向上がシステム効率を改善し、低推進力域における燃料節減効果につながったと考えられる。また、極低負荷域において、両舷のクラッチを滑らせ運用している現行型システムと比較し、前提案型システムでは左舷プロペラをモータにより駆動するため左舷クラッチを常に嵌合させた状態で運用することが可能である。しかし、右舷クラッチはその限りではないため、右舷主機は滑り損失を伴った上で、両舷の推進力と船内電力を賄わなければならない。

その一方で新提案型システムにおいては、クラッチをモータジェネレータとプロペラの間へ移動したため、軸発電機を滑り損失無く駆動することが可能である。そのため前提案型システムと比較して効率良く、左舷モータ及び船内へ電力を供給することが可能である。それに加え、軸発電機を常に機関最低回転数以上で運転することができるため、前提案型システムと比較して高い端子間電圧を維持することができる。これにより若干ではあるがPC-1の電力変換効率を改善することができた。このような理由から両舷の合計推進力が450kW以下において、新提案型システムは前提案型システムと比較して更なる燃料節減効果を示したと考えられる。

その一方で提案型システムでは、主機1台による運用のため両舷の合計推進力が1200kWまでしか運用することができない。そのため作業海域の移動時など高出力が要求されない場合に限定された運用が要求される。タグボートは運用特性上、海域移動や作業前の待機時間の割合が多いためこの新提案型システムを効果的に運用することが可能であると考えられる。

## 7. おわりに

本論文では前提案型システムと新提案型システムの比較を行った。その際主機1台を運用した場合を例に挙げて、その運用における燃料消費特性を示した。提案型システムではその他にも発電機のみを運転した純電気推進による運用など様々な運用方法が考えられる。そのため、これら

の運用方法についても同様の解析を加え総合的な評価を加える必要がある。その上で別途計測により得た複数のタグボートの運行データをもとに、燃料消費シミュレーションを利用することで、統計的な燃料節減効果を明らかにする。

## 参考文献

- (1) 白石浩一、南俊一、小倉宏明「環境配慮型曳船の研究開発」日本海事協会誌 No.307、 pp.47-52 (2014)
- (2) Gary Faber, Jason Aspin, “The Foss Hybrid Tug: From Innovation to Implementation”, Proc. of The 20th International Tug & Salvage Convention and Exhibition in Singapore (2008), pp.149-156
- (3) Susan Hayman, Elizabeth Reynolds Boyd, “The Foss Hybrid Tug: The Journey to the Future”, Proc. of The 21st International Tug & Salvage Convention and Exhibition in Canada (2010), pp.155-158
- (4) Jason Aspin, Aspin Kemp & Associates, “The Hybrid Tug Reality – The Business Case for Green Technology in the Tugboat Industry”, Proc. of Tugology in Amsterdam (2009)
- (5) Paul Jamer, John Eldridge, Aspin Kemp & Associates, Canada, “Conversion of Kotug’s RT Adriaan to become Europe’s First Hybrid Tugboat”, Proc. of The 22nd International Tug & Salvage Convention and Exhibition in Spain (2012), pp.209-223
- (6) 齋藤淳、木船弘康、畑中義博「低環境負荷型タグボートのシステム構成とその運用方法」第82回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集、 pp.21-24 (2012)
- (7) Hiroyasu Kifune, Takaaki Nishio, “A study on Fuel Consumption Model Using Tug Boat’s Propulsion System”, Transaction of Japan Institute Of Marine Engineering, Vol.50, NO.4, pp.129-136 (2015)
- (8) 西尾尚晃、木船弘康「ハイブリッドタグボートにおける燃料消費特性とその運用方法」第84回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集、 pp.307-312 (2014)
- (9) Takaaki Nishio, Hiroyasu Kifune, “A study on simulations of fuel consumption in hybrid propulsion system for tugboat”, Proc. of The International Symposium on Marine Engineering 2014 in Harbin (2014), PID150
- (10) 西尾尚晃、木船弘康「ハイブリッドタグボートにおける燃料消費特性」平成26年電気学会産業応用部門大会講演論文集、Y116(2014)
- (11) Hiroyasu Kifune, Takaaki Nishio, “A study on hybrid propulsion system without battery for tugboat”, Proc. of International Symposium on Marine Engineering & Technology 2013 in Busan (2013), pp.193-196
- (12) 日本港湾タグ事業協会「平成26年度会員所属タグ一覧表」CD-ROM