

S2-1 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

○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

本研究で対象とするハーバータグボート(以下、タグボートとする。)は、主な業務が大型船の出入港の補助である。業務の特性上、自船の推進に必要な出力以上の推力発生が求められるため、船体サイズと比較して高出力の主機を搭載している。しかし、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。一般的な内燃機関において、低負荷における熱効率は低い。そのため、タグボートは低効率における運用時間が長いといえる。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⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。しかし、大容量電池を利用することによって、建造費が高価になる傾向がある。また寿命を迎えた電池を処分しなければならないという問題も生じる。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⁽⁶⁾。そして、そのシステムの運用方法について評価を行うために、燃料消費量を算出するための燃料消費モデルを作成した⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾。本論文では、シミュレーション上において従来型システムと提案型システムを搭載したタグボートを運用することで、燃料消費特性の面から評価を行った。

2. 推進システム

図1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いる。システムは、主機系統及び発電機系統で構成されており、この2系統は独立している。本論文では、この推進システムを従来型システムとする。

提案型システムは、従来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)、電力変換器(PC)により接続している(図2)。これによって、両系統間でのエネルギーの授受が可能となる。なお、モータジェネレータは主機とプロペラをつなぐ中間軸にギアレスで直結しているものとする。

この提案型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可能である。それに加えて、純電気推進モードでの運用も可能となる。また、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。これによって1台の主機だけで両舷のプロペラを駆動することも可能である。

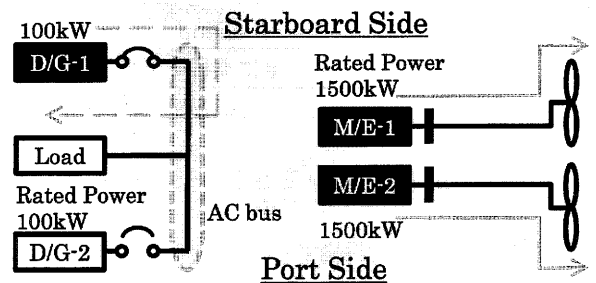


図1 日本国内における従来型タグボートの推進システム

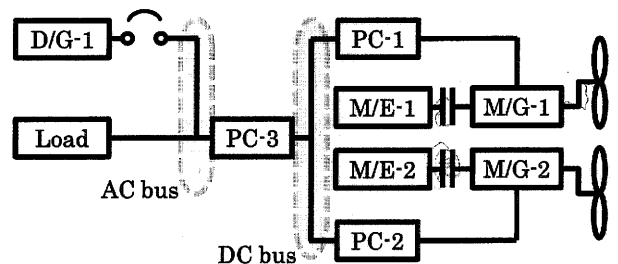


図2 提案型システム

3. タグボートの運用

タグボートの運用を把握するために、タグボートの主機負荷率を実測した。その一例を図3に示す。この計測データからタグボートの主機負荷率は頻繁に変動することが明らかである。また、大型船の出入港補助を行う時間は短い一方で、作業開始時刻まで待機している時間や、作業場所まで移動している時間が多くを占めていることが分かる。このタグボートの特徴をもとに本研究では、タグボートの運用を3つの状態に分類した(表1)。

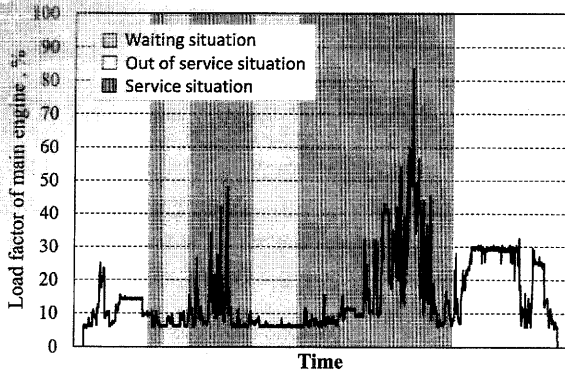


図3 あるタグボートにおける主機負荷率の実測例

表1 各運用状態

待機状態	Waiting situation
大型船の近くで作業時刻まで待っている状態	
自走状態	Out of service situation
基地と作業場所の間を移動している状態	
作業状態	Service situation
出入港する大型船を安全に支援する状態	

4. 燃料消費シミュレーション

提案したシステムを評価するにあたり、タグボートのシステム効率を算出することができる燃料消費モデルを作成した(図4)。システム効率を算出するにあたり、システムを構成する各機器の効率が必要となる。しかし、主機及び発電機原動機の熱効率、モータジェネレータ及びオルタネータの動力変換効率、電力変換器の電力変換効率は、負荷率に対して一定ではない。

熱効率及び動力変換効率は、それぞれ定格出力とその定格に対する運転負荷率により変化する。そのため本研究においては、タグボートを含む複数の船舶の完成図書から実際のデータを引用して効率値推定のための数式モデルを構築した。電力変換器の効率に関しては、軸回転数、周波数、端子間電圧、入出電流、力率を考慮して様々な条件でパワーエレクトロニクスシミュレーションを行った。そしてこの計算結果をもとに効率推定マップを作成した。

この燃料消費モデルを利用することで、図3に示すような主機負荷率を要求推進出力として捉え、その出力を満たすよう運転した場合の燃料消費量を算出することができる。

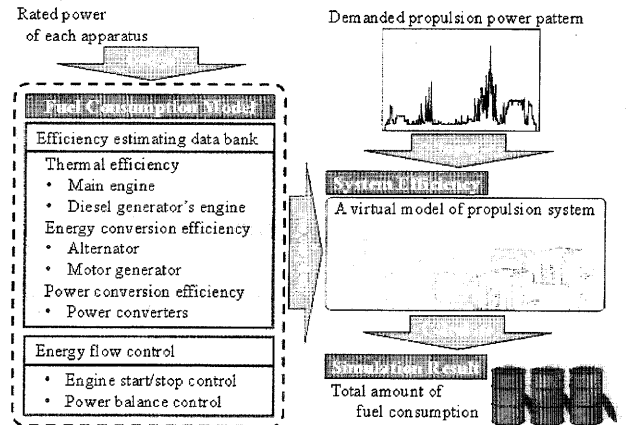


図4 燃料消費シミュレーション

5. シミュレーション条件

5.1 各機器の定格出力

燃料消費量を算出するにあたり、各機器の定格出力を設定する必要がある。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⁽¹⁾。このことから本論文では、従来型システム及び提案型システムでの各機器の定格を表2、表3のように設定した。この設定条件のもとでシミュレーションを実施した。

表2 従来型システムにおける各機器の定格出力

Item	Rating	Number
Main Engine	1,500 kW	2 equipped
Diesel Generator	100 kW	2 equipped

表3 提案型システムにおける各機器の定格出力

Item	Rating	Number
Main Engine	1,350 kW	2 equipped
Diesel Generator	300 kW	1 equipped
Motor Generator	860kVA	2 equipped
Power Converter 1	880kVA	4 blocks
Power Converter 2	880kVA	4 blocks
Power Converter 3	270kVA	2 blocks

5.2 各運用状態における主機及び発電機の発停状態

提案型システムでは、主機及び発電機系統間でのエネルギー授受が可能である。これにより要求出力が低いと判断される場合には、主機及び発電機の運転台数を減らすことができる。本論文では、運用状態ごとに主機及び発電機の発停状態を設定した(表4)。

各運用状態内では、この設定された発停状態のもと機器を運転する。

表4 主機及び発電機の発停状態

	M/E-1	M/E-2	D/G-1
Waiting	RUN	STOP	STOP
Out of service	RUN	STOP	RUN
Service	RUN	RUN	RUN

タグボートが作業時刻まで待機している待機状態 (Waiting) では、主機出力は自船の船位保持のためだけに利用される。そのため要求推力は非常に低い。よって待機状態時には主機1台により運用するものとした。

自走状態 (Out of service) は、タグボートが基地と作業場所の間を移動している状態である。この時、港内において船舶は定められた速度で航行することが要求される場合がある。そのため要求推力は低出力から中出力である。よって主機1台に加えて発電機1台を運転するものとした。

大型船の安全な出入港を支援する作業状態 (Service) では、要求出力は低出力から高出力まで幅広く要求される。よって、すべての主機及び発電機を運転するものとした。

6. シミュレーション結果

6.1 従来型システム

従来型システムにおいて、推進力は2台の主機 (M/E-1、M/E-2) より伝達される。また船内負荷 (Load) には発電機 (D/G-1) から電力が供給される (図5)。本シミュレーションでは、各舷の要求推進力が等しいと仮定している。そのため、図6に示すように各舷の主機出力は同一である。また船内負荷は要求出力にかかわらず一定値 (30kW) としてシミュレーションを行った。図6に従って主機及び発電機を運転するという条件のもと燃料消費特性をシミュレーションにより算出した。

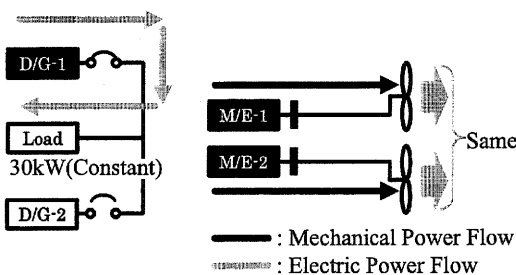


図5 従来型システムにおけるエネルギーフロー

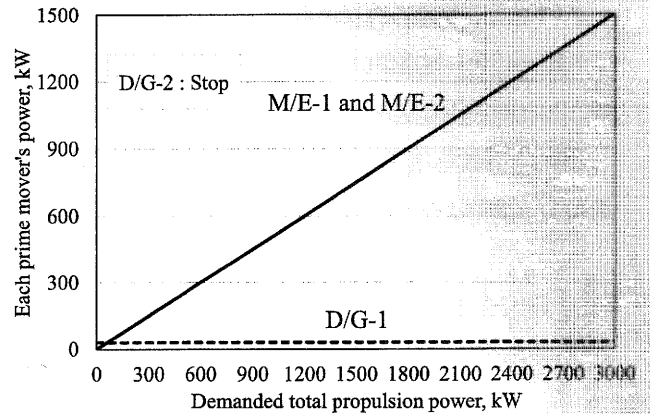


図6 従来型システムにおける主機及び発電機の出力

この従来型システムにおける燃料消費特性を基準として、提案型システムがどの程度燃料消費節減に効果を発揮しうるかを比較し、評価を行った。

6.2 提案型システム

6.2.1 待機状態

先述の通り、提案型システムが待機状態にある時、主機1台のみを運転することと設定した。ここでは右舷主機 (M/E-1) を運転している場合について説明する。

この運用では、推進力と船内負荷 (Load) を主機1台の出力で賄っている (図7)。各要求推進力における、主機 (M/E-1) の出力を表したものが図8である。

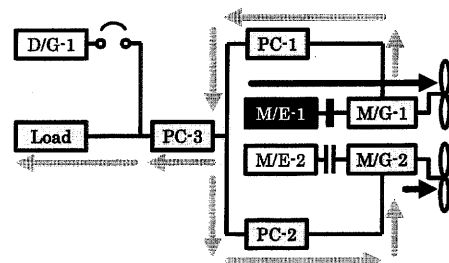


図7 待機状態におけるエネルギーフロー

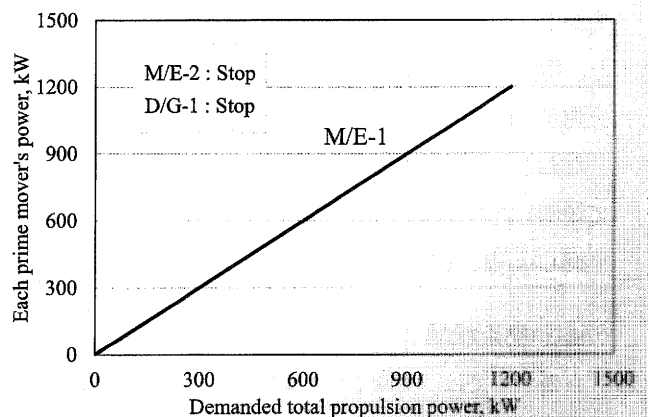


図8 待機状態における主機の出力

この運用における燃料消費特性をシミュレーションにより算出した。従来型システムにおける燃料消費特性を基準とした時の提案型システムにおける燃料消費特性を図9に示す。縦軸は、提案型システムにおける燃料消費増減量を示し、横軸は両舷の合計要求出力を示している。

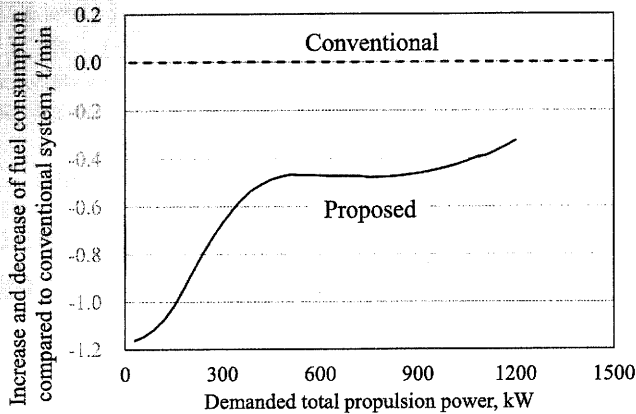


図9 待機状態における提案型システムの燃料消費特性

この運用では従来型システムで運転していた主機及び発電機を停止することができる。要求推進力を主機1台で賄うため、従来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。これによりシステム効率が改善され、燃料消費節減効果が得られる。低推進力域における燃料消費節減効果が顕著な理由としては、主機のサイズダウンによる負荷率向上によるものである。一般的な内燃機関は負荷率20%以下における効率低下が著しい。従来型システムにおいて、主機負荷率20%以下は両舷の合計推進力が600kW以下に相当する。この推進力域において、提案型システムではシステム効率を改善することができたため、このような結果になったと考えられる。

その一方で、主機1台による運用のため両舷の合計推進力が1200kW付近までしか出力することができない。しかし、待機状態では高出力が要求されないため、このような運用が可能である。

なおここでは、右舷主機(M/E-1)を運転した場合について説明したが、左舷主機(M/E-2)1台による運用をした場合も同じ結果になると考えられる。

6.2.2 自走状態

自走状態では、主機1台と発電機1台を運転する。ここでは、右舷主機(M/E-1)と発電機(D/G-1)を運転している場

合について説明する。

この運用において、右舷プロペラは、M/E-1により直接駆動することができる。一方、左舷プロペラはM/G-2により駆動される電気推進モードとなる。M/G-2駆動用の電源としては、D/G-1に加えて、M/G-1を軸発電機として利用することができる。これら電源の負荷分担の仕方をパターン1及びパターン2として例示し、その検討結果について述べる。なお、船内負荷はD/G-1が負うものとする。

・パターン1

パターン1では、D/G-1の負荷率が100%になるまでM/G-2により左舷のプロペラを駆動する。この間、右舷のプロペラには、M/E-1から直接動力が伝達される(図10a)。

D/G-1の負荷率が100%に達した後は、M/G-1を軸発電機として利用する。これによりM/E-1の出力の一部をD/G-1の電力に加えてM/G-2へ給電する(図10b)。

このパターン1における主機(M/E-1)及び発電機(D/G-1)の出力分担を示したものが図11である。

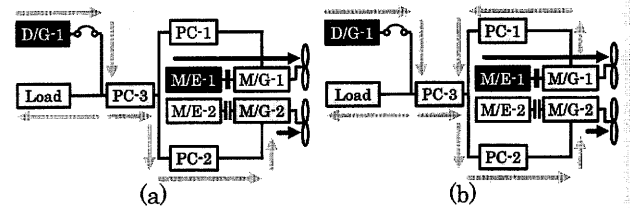


図10 自走状態(パターン1)におけるエネルギーフロー

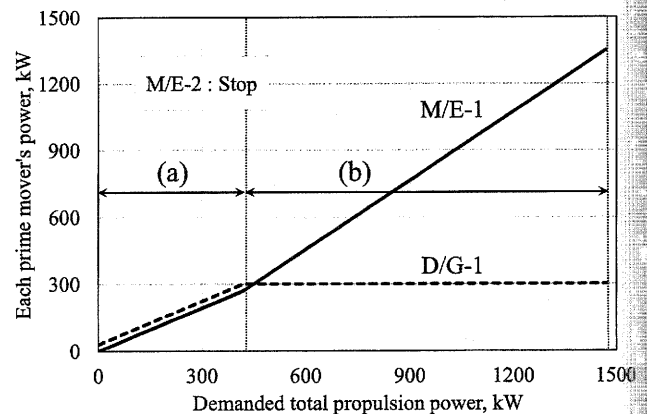


図11 自走状態(パターン1)における主機及び発電機の出力分担

・パターン2

パターン2では、M/E-1の負荷率が80%(1100kW)に達するまで、M/E-1の出力のみにより両舷のプロペラを駆動する(図12a)。

この後さらに要求推進力が高くなった場合は、M/E-1の出力(負荷率)が更に高くなるが、M/G-1からM/G-2へ給電する電力は一定のままとする。したがって、80%から100%までの差分の20%の出力は右舷プロペラに伝達される。そしてD/G-1は左舷プロペラの駆動力の不足分のみを補う(図12b)。

このパターン2における主機(M/E-1)及び発電機(D/G-1)の出力分担を示したものが図13である。

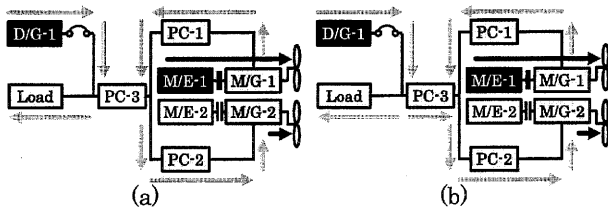


図12 自走状態(パターン2)におけるエネルギーフロー

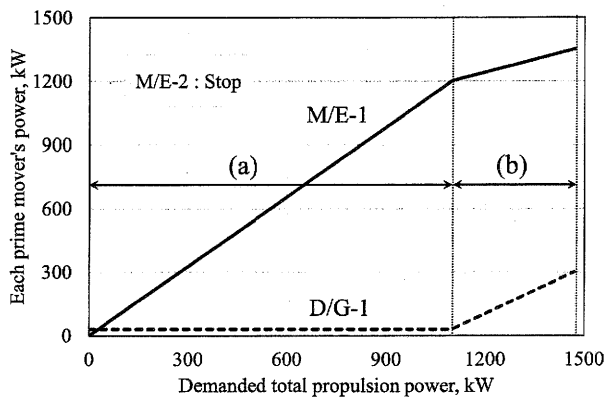


図13 自走状態(パターン2)における主機及び発電機の出力分担

これらのパターン1及びパターン2における燃料消費特性をシミュレーションにより算出した。従来型システムにおける燃料消費特性を基準とした時の提案型システムにおける燃料消費特性を図14に示す。

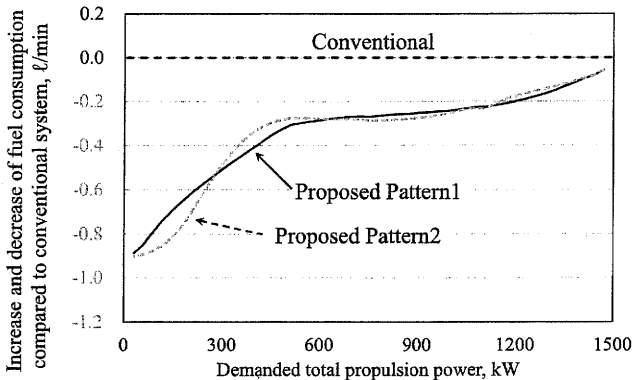


図14 自走状態における提案型システムの燃料消費特性

待機状態(図9)と比較して、自走状態では発電機を追加運転したため両舷の合計推進力が1500kW付近まで出力することが可能となった。その一方、発電機を追加運転したため待機状態と比較して燃料節減効果が小さくなった。

燃料消費特性の面からはパターン1とパターン2に大きな差は見られなかった。

なおここでは、右舷主機(M/E-1)と発電機を運転した場合について説明したが、左舷主機(M/E-2)と発電機を運転した場合も同じ結果になると考えられる。

6.2.3 作業状態

作業状態では、従来型システムと同様に主機2台と発電機1台を運転している。

この運用では、主機の負荷率が100%になるまで2台の主機(M/E-1、M/E-2)がそれぞれのプロペラに直接動力を伝達する。また、船内負荷(Load)には発電機(D/G-1)より電力を給電する(図15a)。

主機負荷率が100%に達した後は、発電機(D/G-1)の電力が電力変換器(PC-1、PC-2、PC-3)及びモータジェネレータ(M/G-1、M/G-2)を介すことで、両舷のプロペラを加勢する(図15b)。

この運用における、主機(M/E-1、M/E-2)及び発電機(D/G-1)の出力分担を示したものが図16である。

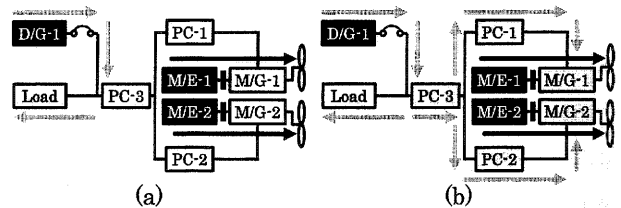


図15 作業状態におけるエネルギーフロー

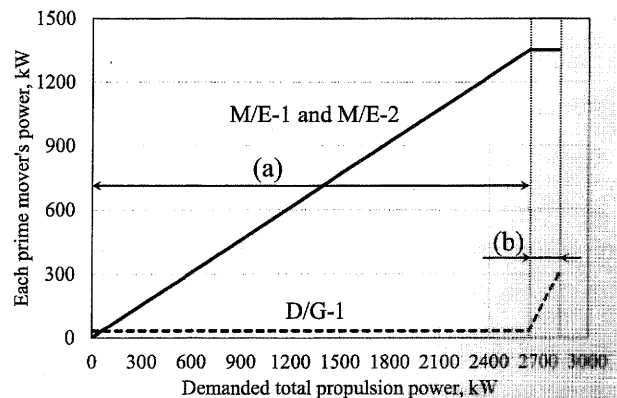


図16 作業状態における主機及び発電機の出力分担

この運用における燃料消費特性をシミュレーションにより算出した。従来型システムにおける燃料消費特性を基準とした時の提案型システムにおける燃料消費特性を図17に示す。

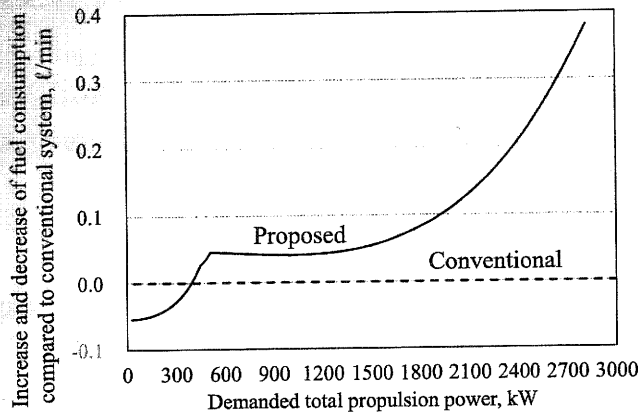


図17 作業状態における提案型システムの燃料消費割合

両舷の合計出力が 500kW 以上の出力範囲において従来型システムの燃料消費量を上回る。この理由としては、従来型システムに比べ提案型システムでは主機定格が小さくなっているため全体的に熱効率が低下したという要因があげられる。これに加えて主機出力をモータによりアシストする場合には、電力変換器において電力損失が発生する。このためシステム全体の効率が低下し、結果として燃料消費の増加が生ずると考えられる。ただし、タグボートの運用特性上、大きな推進力が要求される時間は極めて短い。よって実際の運用では燃料消費量が増加することはほとんどないと考えられる。以上のことから本論文で示した提案型システムは作業全体を通して燃料消費量節減効果が期待される。

7. おわりに

本研究では、大容量電池を用いないハイブリッド推進システムを提案しており、その燃料消費節減効果についてシミュレーションで検証を行った。提案型システムはモータジェネレータと電力変換器により主機と発電機が相互に結びつき、あらゆる負荷に対して電力及び動力を伝達することができる。このため、高出力が要求されないと判断される場合において、主機や発電機を停止することができる。その結果、運転中の主機及び発電機の負荷率を高くするこ

とができる。これは推進システム全体の効率の改善につながるため、燃料消費量節減効果が得られたと考えられる。

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) 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
- (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」平成 26 年電気学会産業応用部門大会講演論文集、Y116(2014)
- (9) 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
- (10) 西尾尚晃、木船弘康、畑中義博「電動アシスト型タグボートにおける推進システムの運用方法」第 83 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集、 pp.143-146 (2013)
- (11) 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