

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：12614

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760673

研究課題名(和文) 低環境負荷型タグボートの推進システム構築を目的とした研究

研究課題名(英文) A study for composing of the environmental-friendly propulsion system of tugboat.

研究代表者

木船 弘康 (Kifune, Hiroyasu)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・准教授

研究者番号：90323849

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：タグボートの低環境負荷化を目的として、ハイブリッドタグボートのシステムについて検討を行った。ハイブリッドシステムと従来方式とを比較して燃料消費傾向がどのように変化するかを推定する必要がある。そこで実機データに基づくデータベースを背景として、タグボートの燃料消費モデルを構築した。これにより様々なシステムのタグボートにおける燃料消費傾向をシミュレーションすることができるようになった。このシミュレーションを運用することで、ハイブリッドシステムの最適化を検討するための基礎資料を作成することができる。

研究成果の概要(英文)：The system of the hybrid tugboat was examined for the purpose of the reduction in the environmental impact of a tugboat. It is necessary to presume how a hybrid system is compared with the conventional system and a fuel consumption tendency changes. Then, the fuel consumption model of the tugboat was built by making the data base based on system data into a background. Thereby, the simulation of the fuel consumption tendency in the tugboat of various systems can be carried out now. By employing this simulation, the underlying data for considering optimization of a hybrid system can be created.

研究分野：パワーエレクトロニクス

科研費の分科・細目：計画・設計・生産システム

キーワード：タグボート ハイブリッド 省エネ 燃料消費推定

1. 研究開始当初の社会背景

本補助金を受ける前に実施してきたプレスタディを開始した2010年以降、先進各国の沿岸大気環境汚染に対する船舶の寄与度が注目されてきた。国際海事機構(IMO)による慎重な調査研究が進められ、北米と欧州を中心とする海域の一部で窒素酸化物および硫黄酸化物の排出規制を強化する動きが加速した。

これに合わせて、我が国においても国土交通省が調査検討を開始した。この規制強化はECA(Emission Control Area)と呼ばれる海域にのみ適用されるが、関係者の注目は東京湾を含む国内の主要港湾がECAの適用範囲に入るかどうかであった。本補助金で研究対象としたタグボートはこのECAの適用を受ける下限域の船舶であり、環境対策に対する技術的な困難の度合いが他の大型船舶より著しく高い状況であった。この状況を受け、船用エンジン各社は次々に新規規制対応のシステムを開発・提案する技術的な新時代を迎えることとなった。

一方、研究代表者を含む東京海洋大学の研究グループでは、リチウムイオン電池を動力源とした電池推進船「らいちょうI」の開発(2011年ポートオブザイヤー特別賞、シップオブザイヤー小型客船部門賞を同時受賞)に成功しており、船舶の電動ドライブに関する新しい知見と技術的ノウハウを得ている状況にあった。

こうした社会的背景を受け、また実際の建造と運航実績に裏打ちされた蓄積技術を利用して、本研究ではハイブリッドタグボートの推進システムに関する基礎研究を実施した。

2. 研究の目的

20トン未満の小型船舶として分類される電池推進船とは異なり、タグボートは一般的に200トン前後の大きさであり、実際に建造することは建造費用、維持費用、運航費用に膨大な支出が伴う。そこで、本研究では、一般的なサイズのタグボートを建造することを前提とした燃料消費シミュレーションの構築を最終目標として設定した。このシミュレーションを多面的に運用することで、ハイブリッドタグボートがどのように燃料を消費するかといった傾向を把握し、同時にハイブリッドタグボートの推進システム全体の最適化を図ることをも目的とした。

3. 研究の方法

これらの目的を達成するため、以下の手順で研究を実施した。

【Step 1】実際のタグボートがどのような使われ方をし、どのような燃料消費パターンを持つのかについて、実船調査を通じて詳細なデータを得る。これにより、作業内容に応じた運航モデルの構築を行う。

【Step 2】メインエンジンや発電機、各種電

気機器、電池がどのように連携し、エネルギーを融通すべきかを検討し、新しい推進システムの構築を目的とした基本設計手法を提案する。

【Step 3】提案設計法に基づき、性能要件を満たす推進システムの設計を行う。基本設計された推進システムモデルに対し、実測で得られた運航データを流し込み、環境性能を評価する。

図1に申請時に予定していた研究実施プロセスを示す。

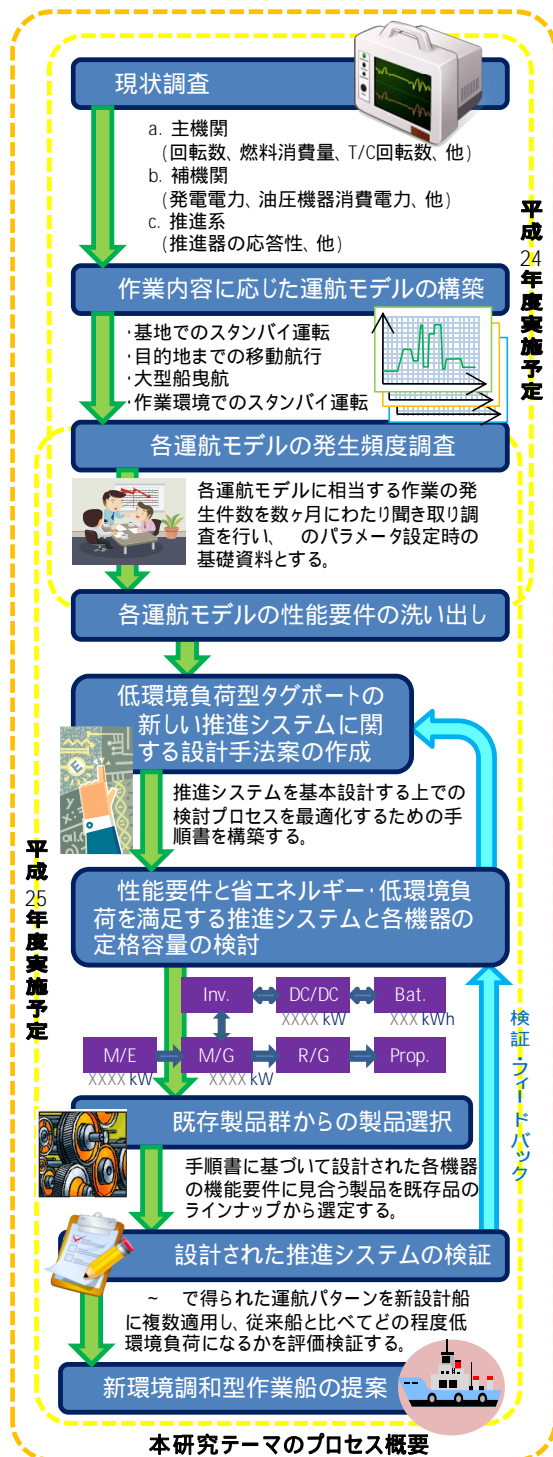


図1 申請時に予定していた研究プロセス

4. 研究成果

(1)燃料消費パターンの調査

Step 1の～(図1参照)では、実際のタグボートでどのような燃料消費パターンで運航されているのかを実船調査を実施した。調査にあたっては、東京湾および大阪湾で営業運航するタグボート事業者の協力を得て実施した。

当初、タグボートのリアルタイムな燃料消費パターンを把握する手法として、燃料油配管系統に超音波式非接触型流量計を設置することを想定していた。しかし、実際の現場では市販の非接触型流量計を設置できる条件がクリアできず、正確な実測が困難であることが判明した。また小型内航船であるタグボートは他の大型貨物船と異なり、機関や船内機器のデータを記録管理する仕組みの導入が不十分であり、各種データのデジタル取得も困難な状況にあることが判明した。しかしながら、5～6年以内に建造された比較的新しいタグボートでは、メインエンジンや各機器の運転状態が記録はされないものの、逐次モニタで確認できる仕組みが導入されていた。ただし、このデータをデジタルデータのままダウンロードする仕組みは存在しなかった。

メインエンジンや各機器の生データを船内の制御用アナログ配線から取り出すことも技術的には可能であったが、船の運動能力を司る神経系に直接接触することは万が一を考慮すると、避けるべきとの見解に至った。そこで、本研究ではモニタに表示された文字を専用カメラで連続撮影し、この撮影画像を専用開発した文字認識・抽出ソフトによりテキストデータ化するというシステムを開発することから開始せざるを得なかった。このシステムでは、タブレットPCに接続されたUSBカメラレンズセット(制御室の天井に取り付け)により3秒に1回の速度でメインエンジンモニタを撮影した。これにより膨大なモニタ画面の撮影データ(jpegファイル)を得た。文字抽出認識ソフトには、写真データ内に映り込む文字データ部分を切り出し、正対撮影と同等となるよう歪み補正を自動で行うプログラムを開発した。これに加え、補正データから文字部分を抽出し、これをサンプルテキストパターンと照合する形で文字認識させ、テキストデータとして記録するという一連の処理を自動で実施できるソフトを約10か月間かけて完成させた。

このソフトの完成を前提として、総合定格3000kWの出力を持つ実際のタグボートにおいて燃料消費傾向を把握するためのデータ収集を行った。データ収集は東京湾と大阪湾それぞれで営業運航する実際のタグボートで実施した。

以上のプロセスを経て、収集された連続写真データを自作した文字認識ソフトでテキストデータ化し、タグボートの燃料消費傾向を可視化することに成功した(図2)。

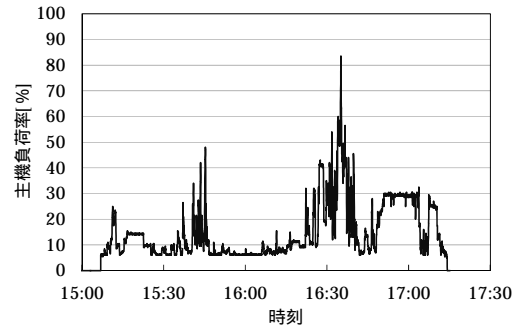


図2 タグボートの燃料消費パターン例^{[2][3]}

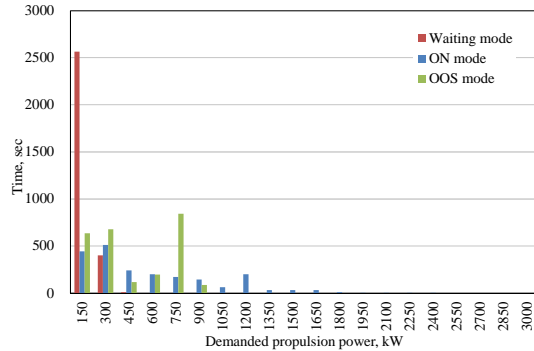


図3 状態別のエンジン出力の発生頻度^[4]

図2から明らかなように、タグボートのメインエンジンの負荷率が高くなる条件はごく短時間であり、低負荷運転状態が長時間にわたって発生している傾向にあることがわかった^{[2][3]}。このデータに加え、東京海洋大学で独自に記録保存している東京湾内のAIS情報を洗い出し、タグボートと被支援船のGPSデータを抽出した。これにより、タグボートが作業中であるのか、待機中であるのか、あるいは移動中であるのかを判別した。その結果の一例として、タグボートのデューティとメインエンジンの負荷率との関係を図3に示す^[1]。図から、タグボートは運航時間に占める待機(Waiting mode)状態が非常に長いことが明らかとなった。また作業環境への移動中など(OOS: Out of Service)では、航海時間が長い場合があること、港内操船で一定以上の速力を維持することが求められること、などから30%前後のパワーを出す時間が長いことも明らかとなった。

このため、待機モードやOOSモードでは、低負荷運転でも効率が高まるような推進システムの開発が必要になると考えられる。

(2)新型ハイブリッドシステムの概念設計

当初、リチウムイオン電池を利用するハイブリッドシステムの設計を念頭に検討を進めてきた。しかし、実際のタグボート事業者数社とのコミュニケーションを通じて、リチウムイオン電池を搭載するシステムの経済性という観点に大きな疑問が呈されることとなった。例えば待機モードやOOSモードのように、低負荷運転状態が長く続く場合に、リチウムイオン電池をエネルギーソースと

して利用する方法が考えられる。この場合、燃費性能は格段に上がることが期待されるが、今後燃料費の高騰が続いても、初期投資費用を回収できるだけの燃料費節減効果を得る見通しは立たなかった。一方、リチウムイオン電池をエネルギーソースとしてではなく、ハイブリッド自動車のようにエネルギーバッファとして利用する方法も考えられる。この場合、搭載電池容量をある程度限定できるが、大電流による頻繁な充放電が発生し、現行の電池そのもののサイクル寿命では船舶推進機器として要求されるクオリティと信頼性を満足することは困難であるとの見解に至った。そこで、電池を用いないハイブリッド推進システム^{[1][4]}の研究開発をする方向に大きく舵を切った。

電池を用いないハイブリッド推進システムとしては、図4(a)(b)に示す2種類の仕組みが原型として考えられる。それぞれのシステムでは、様々なエネルギーフローのパターンが存在し、ACバス接続型で24通り、DCバス接続型で32通りあることが判明している。これに加え、各機器の定格出力や負荷率、出力合成割合等の各種条件を網羅し、あらゆる条件でのシステム効率を算出することが可能な燃料消費モデルを構築した。

この燃料消費モデルにはメインエンジンである中速船用4ストロークエンジン、発電機用定速ディーゼルエンジン、オルタネータ、モータジェネレータの効率推定モジュールが格納されている。この効率推定モジュールは、既に就航済み船舶の完成図書から引用した実データを元に構築されており、定格出力と負荷率との関係から機器効率が導かれるよう関数化してある。またインバータ等の電

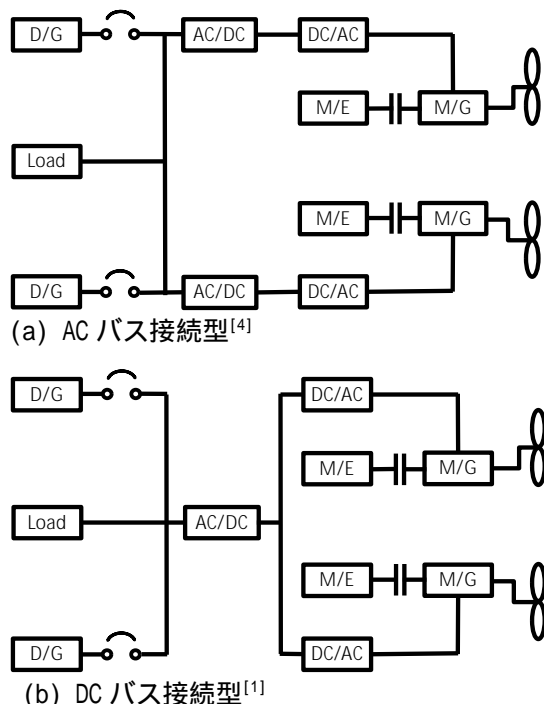


図4 電池を用いないハイブリッド推進システム

力変換器は専用のパワーエレクトロニクスシミュレーションソフトを用いて、モータジェネレータの回転数、必要トルク、ACバス力率、高調波抑制対策、スイッチング損失等の諸条件をすべて考慮に入れた効率データマップを予め作成した(図5)。このデータマップを元に要求動作条件での電力変換効率の推定値が出力できるモジュールを開発した。また、クラッチおよびZドライブギアといった動力伝達機構の効率は負荷率等に関係なく一定値としてモジュールを構成した。以上の効率推定モジュールを燃料消費モデル内に組み込み、タグボートのあらゆる設計条件、動作条件における推進システムの燃料消費状態を推定することが可能となった(図6)。

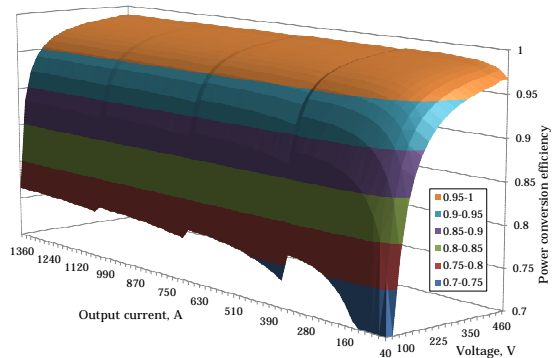


図5 電力変換器の効率推定マップ

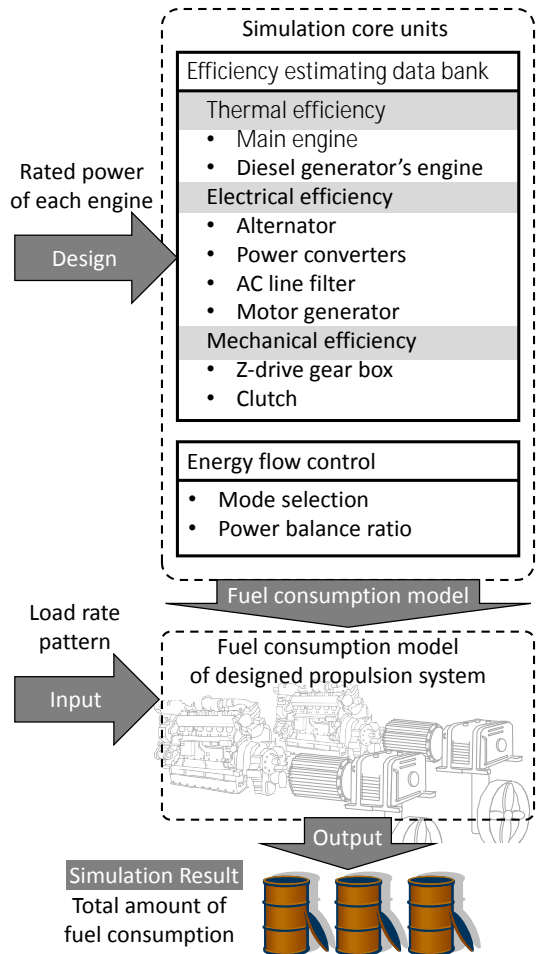


図6 燃料消費モデル

燃料消費モデルにいくつかの設計主要目を与えることで、仕様を満たす燃料消費モデルが計算機上に構築される。このモデルに負荷変動パターン（図2参照）として、実際のタグボートと同様の動きをさせることで、待機から作業に至るまでの全運航時間の燃料消費量が推定される。これを利用することで、従来型のタグボートの推進システムにおける燃料消費状態も推定することができるため、従来型とハイブリッド型の燃料消費に関する比較が可能となった。

(3)燃料消費モデルにより得られた計算結果
図7は提案する燃料消費モデルを用いたハイブリッドタグボートの燃料消費の傾向について計算した結果の一例である。主機の1機あたりの定格出力と主発電機1台あたりの定格出力との合計が1,600kWとなるよう計算条件を与え、それぞれの定格出力を変えて燃料消費の傾向について計算を行った。図中で現行型としているのは、従来型の（ハイブリッド方式でない）タグボートで要求される出力を変化させた場合に消費する燃料消費量を基準値0としている。このため、現行型よりも燃料消費が少なければ、燃料消費増減量 [l/min] がマイナスになる。

図より明らかなように、主機 1,500kW、発電機 100kW の条件では、ハイブリッド化し、かつエネルギーフローを最適に制御することで、あらゆる要求出力の範囲において現行型よりも燃料消費を低減できる可能性が示されている。この理由として詳細に調査したところ、主機系統と電気系統を接続する電力変換器を一種の軸発電機として動作させることで、このような結果が得られていることがわかった。すなわち、低負荷率で運転している発電機を停止することで効率の低い機関を切り離している。同時に、主機の負荷率を上昇させることで、主機の高効率化をも達成している、ということが要因と考えられる。

また、主機と発電機ともに定格を 800kW とすると、低負荷域ほど燃料消費を抑制できる可能性も示された。しかし負荷が高くなると逆に燃料消費が急激に増大する傾向が見られる。この理由も先ほどと同様に、電力変換

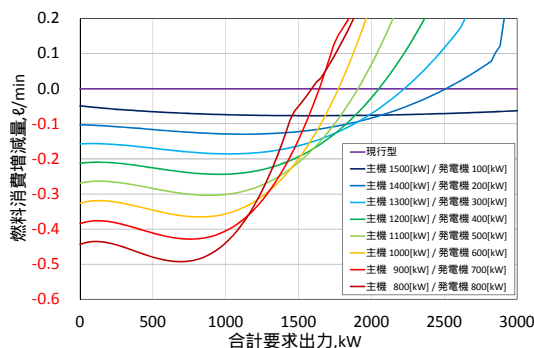


図7 現行型タグボートと比較した各定格配分設計条件における燃料消費増減量

器を軸発電機として利用することで、要求出力が低いときは主機の効率向上が燃料消費低減に効果を発揮するという理由が考えられる。しかしながら高負荷域では、発電機から主機にパワーアシストすることになり、電力変換器やモータジェネレータでのエネルギーロスが発生し、結果的にシステム全体としての効率が低下したものと考えられる。

多くの場合、タグボートの運航時の負荷変動パターンは図3のように低負荷での運転時間が長い。このため低負荷運転時間が長ければ長いほど、主機と発電機の定格が 800kW ずつの条件の方が結果的に燃料消費を低減できる可能性があると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 4 件)

[1] Hiroyasu Kifune, Takaaki Nishio: A study on hybrid propulsion system without battery for tug boat, Proc. Of International Symposium on Marine Engineering & Technology 2013, pp.193-196, 23rd, Oct. 2013, Busan Korea

[2] 西尾尚晃、木船弘康：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 回日本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 年 9 月 3 日、静岡県静岡市

[3] 西尾尚晃、木船弘康：タグボートのハイブリッド化に関する一考察～大容量蓄電池を持たない場合～、平成 25 年電気学会産業応用部門大会、Y-144、2013 年 8 月 28 日、山口県山口市

[4] 斎藤敦、木船弘康：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 回日本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 年 9 月 19 日、香川県高松市

6. 研究組織

(1)木船 弘康 (KIFUNE, Hiroyasu)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・准教授
研究者番号：90323849